

Brigitte Falkenburg (Hrsg.)

# **Natur – Technik – Kultur**

Philosophie im interdisziplinären Dialog

Druckfahne (Einzelaufsatz), 14. Mai 2007

mentis  
PADERBORN



Martin Carrier

## Wissenschaft im Dienst am Kunden: Zum Verhältnis von Verwertungsdruck und Erkenntniserfolg

### 1. Wissenschaft im Anwendungskontext

In der öffentlichen Wahrnehmung tritt die Rolle der Wissenschaft bei der Erkenntnis von Welt und Wirklichkeit hinter ihren Beitrag zur Wirtschaftsförderung zurück. Wissenschaft wird weniger deshalb geschätzt oder gefördert, weil sie etwa die Beschaffenheit der Natur offen legte, sondern weil sie einen Faktor der ökonomischen Dynamik und entsprechend der Wohlstandssicherung darstellt. Daher genießt vielfach die angewandte Wissenschaft Vorrang vor der Grundlagenforschung. Nicht die Erkenntnis der Naturzusammenhänge steht im Vordergrund, sondern deren Kontrolle. Agenda und Erfolgsmaßstäbe der Forschung orientieren sich weniger an den epistemischen Vorgaben der akademischen Wissenschaft, sondern sind stattdessen durch den Anwendungskontext geprägt. Wissenschaft steht heute weithin im Dienst des Kunden; das Anwendungsinteresse durchzieht nachdrücklich große Bereiche der Forschung. Entsprechend richtet sich naturwissenschaftliche Universitätsforschung häufig auf praktische Forschungsziele aus, sie orientiert sich an Drittmittelgebern aus der Industrie und zielt auf wirtschaftliche Nutzung oder Patentierung. Es entstehen Forschungsverbünde zwischen Universitätsinstituten und den Forschungsabteilungen von Unternehmen. Insgesamt gleichen sich weite Teile solcher Universitätsforschung an Projekte der Industrieforschung an.

Solche markanten institutionellen Verschiebungen haben wiederholt zu der Behauptung geführt, die Wissenschaftskultur durchlaufe eine Epochen-schwelle. Gesprochen wird von einer Wissenschaft im „Modus 2“, die dem traditionellen, epistemisch orientierten „Modus 1“ entgegengesetzt wird und unter anderem durch die dominante Anwendungsorientierung so-

wie durch den Einbezug von Praktikern und den Einschluss gesellschaftlicher Werte charakterisiert sein soll (Gibbons et al. 1994, 4–8; Nowotny et al. 2001). In die gleiche Richtung weisen die Slogans von der „post-normalen Wissenschaft“ und der „Transdisziplinarität“, die unter anderem zum Ausdruck bringen, dass Laien in die Gewinnung wissenschaftlicher Resultate einbezogen werden oder einzubeziehen sind (Funtowicz & Ravetz 1993; Funtowicz & Ravetz 1994). Gesprochen wird auch von der „Tripelhelix“ der Unternehmerwissenschaft, wonach, erstens, Universitäten Wissenszuwachs in wirtschaftlichen Gewinn umzusetzen suchen, zweitens Hochtechnologieunternehmen Grundlagenforschung und wissenschaftliche Weiterbildung unterstützen und, drittens, Regierungsstellen in die Rolle von Unternehmern schlüpfen und etwa Risikokapital bereitstellen (Etzkowitz 2003). Allen diesen Positionen und Diagnosen ist die Ansicht gemeinsam, dass Forschung im Anwendungskontext unter grundsätzlich anderen Bedingungen abläuft als herkömmlich erkenntnisorientierte Forschung.

Die zugrunde liegende Feststellung institutioneller Verschiebungen und Veränderungen der Wissenschaftsorganisation trifft sicher zu. Die Nutzungserwartungen an die Wissenschaft und der Einfluss von Nicht-Wissenschaftlern auf die Tagesordnung der Forschung sind im Verlauf des vergangenen Vierteljahrhunderts deutlich gewachsen. Daraus folgt aber nicht ohne weiteres, dass sich auch methodologische Kennzeichen wie das Ausmaß der theoretischen Durchdringung oder die Beurteilungskriterien für Hypothesen ebenso nachdrücklich gewandelt haben. Vielmehr soll dies explizit zum Gegenstand der Untersuchung gemacht werden. Die generelle Fragestellung lautet also, ob der Verwertungsdruck auf die Wissenschaft Auswirkungen auf den Erkenntnisanspruch der Wissenschaft hat, und ob insbesondere die starken Nutzungsinteressen die epistemischen Werte untergraben, auf denen Zuverlässigkeit und Tragweite wissenschaftlichen Wissens beruhen.

Dabei konzentriere ich mich im Folgenden auf zwei Fragen. Die erste richtet sich auf das Verhältnis von Nutzbarkeit und Richtigkeit: Setzt technische Fruchtbarkeit eine auch wissenschaftlich zutreffende Wissensgrundlage voraus? Was sind gegebenenfalls die Gründe und wo liegen die Grenzen einer solchen Bindung von Nutzen und Wahrheit? Meine These ist, dass eine derartige Bindung zwar besteht, aber nur eingeschränkt zum Tragen kommt. Nur bei der Geltungssicherung technisch relevanter Zusammenhänge und entsprechend bei der Erhaltung der Zuverlässigkeit avancierter technologischer Verfahren lässt sich ein genereller Einfluss von Richtigkeit auf Nutzbarkeit plausibel machen. Die zweite Frage zielt auf

den begrifflichen Zusammenhang zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung. Vorstellbar ist dabei, dass Grundlagenforschung, erstens, sachliche Voraussetzung fruchtbarer Technologieentwicklung ist oder umgekehrt, zweitens, aus angewandter Forschung erwächst oder dass, drittens, beide unabhängig voneinander sind. Das Ergebnis lautet, dass sich alle drei Formen finden: das „Kaskadenmodell“, die „interaktive Sicht“ und der „Emergentismus“.

## 2. Angewandte Forschung: Konträre Prima-facie-Erwartungen

Angewandte Forschung zielt auf Gewinnung neuen Wissens ab und unterscheidet sich entsprechend von Formen der Technologieentwicklung, die allein aus dem bekannten Wissensvorrat schöpft und diesen für eine gegebene Problemstellung fruchtbar macht. Der Unterschied zwischen erkenntnisorientierter und angewandter Forschung wird gelegentlich als unklar kritisiert. Auch angewandte Forschung sei auf neue Erkenntnisse gerichtet, umgekehrt sei erkenntnisorientierte Forschung eng mit Anwendungsinteressen verwoben. Dies trifft zwar zu, gleichwohl lassen sich klare Unterschiede zwischen den Erkenntniszielen und den Erfolgskriterien epistemischer und applikativer Untersuchungen aufweisen. Erkenntnisorientierte Forschung strebt primär nach dem Verstehen von Phänomenen und Naturzusammenhängen, angewandte Forschung zielt auf die Befriedigung spezifischer Bedürfnisse oder generell auf Nützlichkeit (Stokes 1997, 6–8). Entsprechend bemisst sich der Erfolg eines Forschungsprojekts in angewandten Forschungszusammenhängen letztlich nach wirtschaftlichen Kriterien, bei epistemischen Untersuchungen hingegen nach der gewonnenen Einsicht in die betreffenden Naturzusammenhänge. Auch dem Augenschein nach besteht zwischen Vorhaben wie dem Bau eines flachen Folienbildschirms auf der Basis von Leuchtdioden verschiedener Farben und der Erforschung der beschleunigten Expansion des Universums ein klarer Kontrast. Das erstgenannte Projekt wird mit Abschätzungen des künftigen Marktvolumens für technische Neuentwicklungen der betreffenden Art gerechtfertigt, das zweite damit, dass der Mensch seit dem Erwachen seines Geistes der Struktur des Kosmos nachspürt. Begrifflich lässt sich damit die Unterscheidung zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung aufrechterhalten. Die Trennlinie verläuft zwischen der Orientierung der Forschung an der Vertiefung des Naturverstehens oder an dem in ökonomischen Kategorien gefassten Nutzen. Der berechtigte Kern des Einwands der fehlenden Trennbarkeit beider Forschungstypen besteht dagegen

in der Zurückweisung der alternativen Einstufung von Forschungsprojekten als entweder epistemisch oder applikativ (s.u. Abs. 11).

Die Unterscheidung zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung wirft die Frage auf, ob die gegenwärtig zu beobachtende dominante Ausrichtung der Forschung auf wirtschaftliche Nützlichkeit Auswirkungen auf die Vorgehensweise und die Beurteilungspraktiken in der Wissenschaft hat. Wenn sich die Wissenschaft auf ökonomische – und auch politische – Zwänge einlässt, könnte ihr Objektivitätsanspruch in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Frage ist also, ob der Dienst der Wissenschaft am Kunden mit einer Beeinträchtigung ihres Erkenntniserfolgs und einer Beschädigung ihrer epistemischen Reputation erkaufte wird oder nicht. Dabei ergibt sich keineswegs sofort ein klares Bild; vielmehr lassen sich mit dem Anwendungsdruck zunächst konträre methodologische Erwartungen verbinden.

Für die Erwartung methodologischer Defizite in der angewandten Forschung sprechen zwei Faktoren, nämlich die externe Vorgabe von Problemen und die Dominanz einer pragmatischen Haltung bei der Beurteilung von Hypothesen. Die externe Vorgabe beinhaltet, dass die Forschungsaufgaben durch Nutzungsanforderungen aus dem politisch-wirtschaftlichen Bereich festgelegt und nicht nach Maßgabe ihrer disziplinären Machbarkeit gewählt werden. Die Folge ist, dass angewandte Forschung tendenziell einer Überforderung durch Komplexität unterliegt. Empirische Wissenschaft ist stets auf die Erfassung von Erfahrungsbefunden gerichtet, aber nicht generell gezwungen, besonders verwickelte Phänomene zu betrachten. Im Gegenteil setzt die empirische Prüfung von Theorien bevorzugt an den ungestörten Fällen an, da sich in diesen die unterstellten Fundamentalprozesse in größerer Deutlichkeit manifestieren. Im Gegensatz zu epistemisch geprägten Zusammenhängen scheidet in der angewandten Forschung die Behandelbarkeit eines Problems, also die Tragfähigkeit von Idealisierungen oder die Übersichtlichkeit und Kontrollierbarkeit von Sachverhalten als Auswahlkriterium für eine Fragestellung oder ein Forschungsprojekt weitgehend aus. Wegen der externen Festsetzung der Forschungsagenda und der starken Nutzungsanforderungen ist angewandte Forschung einem spezifischen Druck zur Komplexität ausgesetzt, der sie letztlich zur Bearbeitung besonders verwickelter und theoretisch undurchsichtiger Problembereiche zwingt (Krohn & van den Daele 1997, 194–195, 199–200).

Die pragmatische Haltung angewandter Forschung drückt sich in deren primärer Verpflichtung auf das angemessene Funktionieren eines Verfahrens oder eines technischen Geräts aus. Es geht in erster Linie um den Eingriff in den Naturlauf, nicht um dessen Verstehen; es geht um die Entwicklung marktfähiger Produkte, nicht um die Gewinnung von Einsichten.

Forschung ist eine Investition, die – wie andere Investitionen – ihre Rendite zu erbringen hat (Dasgupta & David 1994, 495–498). Diese Haltung legt das Vorherrschen einer oberflächlichen Beurteilungspraxis nahe, in der die Einschätzung von Hypothesen weniger von ihrer Fähigkeit zur Durchdringung der betreffenden Sachbereiche abhängt, als von ihrer Tauglichkeit für die technische Intervention. Für diesen Zweck kann sich die Prüfung der zugrunde liegenden Annahmen aber auf die technologisch relevanten Parameterbereiche beschränken, während bei einem Erkenntnisanspruch eine systematische und umfassende Prüfung geboten ist (Polanyi 1962, 182–183).

Überlegungen dieser Art legen die Vermutung nahe, dass die Überforderung der Wissenschaft durch Komplexität ein tiefer gehendes Verständnis der einschlägigen Naturzusammenhänge unmöglich macht und dass die Beschränkung auf unmittelbare Nutzbarkeit solche Erkenntnisanstrengungen zugleich unnötig erscheinen lässt. Die Folge wäre eine vermehrte Oberflächlichkeit angewandter Forschung; das Verwertungsinteresse beeinträchtigte das Erkenntnisstreben.

Diese Vermutung lässt sich durch Erfahrungsbelege aus der klinischen Prüfung neu entwickelter Medikamente stützen. Die Ergebnisse von vergleichenden Untersuchungen der Wirksamkeit neuer Pharmazeutika stimmen markant mit den wirtschaftlichen Interessen der Auftraggeber der betreffenden Untersuchung überein. In einer Analyse von 107 vergleichenden Untersuchungen konkurrierender Medikamente fand sich kein einziger Fall, in dem ein Arzneimittel, das von dem Auftraggeber der betreffenden Studie hergestellt wurde, als weniger wirksam als ein Konkurrenzprodukt bezeichnet wurde. Zumindest bei medizinischen Studien dieser Art erzeugen wirtschaftliche Interessen allem Anschein nach epistemische Defizite (Davidson 1986; Brown 2005).

Einflussreiche Stimmen stützen diese Defizienzvermutung; sie wurde zum Beispiel von keinem Geringeren als Johannes Paul II. nachdrücklich unterstrichen. In einem Schreiben an eine Konferenz zur Bedeutung der Wissenschaft in der Medizin gab der Heilige Vater zu bedenken, dass der Vorrang des Gewinnstrebens in der wissenschaftlichen Forschung ihrem herausragenden Ziel der Entdeckung der Wahrheit abträglich sei (Johannes Paul II. 2002). Auch Stimmen aus der Wissenschaft artikulieren solche Befürchtungen. So beklagt etwa der Physiker John Ziman, dass eine von materiellen Interessen und kommerziellen Zielen getriebene Wissenschaft Objektivität und Universalität vermissen lasse und stattdessen in Parteilichkeit und forschungsethisches Versagen abgleite (Ziman 2002); der Physiker Silvan Schweber sieht die Forderung nach praktischer Relevanz als ei-

ne Quelle des Niedergangs der Wissenschaftskultur (Schweber 1993, 40). Solchen Urteilen zufolge nimmt die Wissenschaft durch den Zwang zur praktischen Nützlichkeit auch in ihrer Glaubwürdigkeit und damit in methodologischer Hinsicht Schaden.

Derartige abträgliche Folgen des Anwendungsdrucks verstehen sich jedoch keineswegs von selbst. Vielmehr ist auch die entgegengesetzte Erwartung nicht ohne Plausibilität, dass gerade angewandte Forschung in besonders hohem Maße auf Verlässlichkeit angewiesen ist und dass diese am besten durch die Produktion und Verwendung von Wissen erreichbar ist, das im Licht strenger Beurteilungsmaßstäbe seine Tauglichkeit unter Beweis gestellt hat (Carrier 2004b, 4–6).

Angewandte Forschung zielt auf marktfähige Güter und Dienstleistungen, die sich erstens nicht selten in einem Massenmarkt und entsprechend in einer riesigen Zahl von Fällen unter unterschiedlichen Anwendungsbedingungen bewähren müssen, und deren Einführung zweitens typischerweise Investitionen nicht unerheblichen Umfangs mit sich bringt. Gerade weil die Resultate angewandter Forschung nicht nur unter kontrollierten Laborbedingungen, sondern unter den verwickelten Umständen der Lebenswirklichkeit ihre Verlässlichkeit unter Beweis stellen müssen, sind sie einer besonderen Vielfalt von Testbedingungen unterworfen und qualifizieren sich bei Bestehen dieser Herausforderung als besonders zuverlässig. Darüber hinaus hat die Entdeckung der Mangelhaftigkeit und Fehlerhaftigkeit solcher praktisch bedeutsamen Güter in der Regel weit dramatischere Folgen als die Zurückweisung einer Hypothese im Laborexperiment. Wenn etwa Medikamente aufgrund unerwarteter Nebenwirkungen vom Markt genommen werden müssen, hat dies nicht selten gewaltige finanzielle Konsequenzen und kann den Kurswert oder gar den Fortbestand eines Unternehmens gefährden. Dies lässt erwarten, dass der Markteinführung strenge Qualitätsprüfungen vorangehen.

Auch für diese Erwartung steigender methodologischer Ansprüche an Wissen im Anwendungskontext finden sich stützende Belege. So wird vielerorts verlangt, die nicht-epistemischen Risiken (also mögliche Gesundheitsbeeinträchtigungen oder Schäden) in die Beurteilung von Hypothesen einzubeziehen. Zum Beispiel verweist die Wahl des Signifikanzniveaus bei toxikologischen Untersuchungen darauf, welcher Fehlertypus für eher akzeptabel gehalten wird: Ein hohes Signifikanzniveau wird zu falsch positiven Resultaten führen und zusätzliche, unter Umständen überflüssige Sicherheitskosten mit sich bringen, ein niedriges Signifikanzniveau wird dagegen falsch negative Befunde heraufbeschwören und entsprechend Gefahren für die öffentliche Gesundheit provozieren. Verbreitet findet sich die Emp-



fehlung, Hypothesen mit hohem Risikopotenzial einer besonders strengen Prüfung zu unterwerfen (Shrader-Frechette 1997; Douglas 2000). Diese Verknüpfung zwischen dem wahrgenommenen Risiko, das mit der Annahme einer Hypothese verbunden ist, und der Erhöhung des Bestätigungsniweaus, das für diese Annahme gefordert wird, wird im politischen Bereich tatsächlich hergestellt. So ziehen die EU-Behörden bei der Regulierung biotechnologischer Risiken ein „Prinzip der Vorsicht“ heran, in dessen Licht die möglicherweise tief greifenden Auswirkungen genetisch veränderter Organismen auf die Biosphäre zu einer Erhöhung der Sicherheitsanforderungen und zur Einführung vorbeugender Maßnahmen führen (Commission of the European Communities 2000).

Ähnlich argumentiert Nancy Cartwright, dass die Geltungsanforderungen beim Übergang in den angewandten Bereich anzuheben sind. Empirische Bestätigungen im praktischen Bereich („*evidence for use*“) müssen den großen Schwankungen in den Anwendungsbedingungen Rechnung tragen, die sich sowohl aus der Vielfalt praktisch relevanter Umstände ergeben, wie auch aus der häufig anzutreffenden Gedankenlosigkeit beim Umgang mit technischen Geräten (Cartwright 2006).<sup>1</sup>

### 3. Pragmatismus versus Kaskadenmodell

Insgesamt lassen sich demnach gegensätzliche Intuitionen hinsichtlich der Zuverlässigkeit angewandter Forschung ausmachen. Einerseits gibt es Grund zu befürchten, dass sich angewandte Forschung in Richtung vermehrter Unzuverlässigkeit bewegt; andererseits sprechen Gründe für die

---

<sup>1</sup>Dieser Eindruck, dass Anwendungsdruck die methodologischen Ansprüche eher steigen lässt, wird durch eine weitere Beobachtung untermauert. Wenn Unzuverlässigkeit oder Nachlässigkeit markant hervortreten, dann sind nämlich in der Regel noch andere Faktoren im Spiel. Zu diesen zählen insbesondere Medienpräsenz und öffentliche Sichtbarkeit. Ein schlagendes Beispiel bildet das Humangenomprojekt, das in seiner Schlussphase von der Konkurrenz zwischen einem öffentlich geförderten Programm und einer privaten Firma geprägt war. Die Folge dieses unter den Augen der Massenmedien stattfindenden Wettlaufs war eine erhebliche Verschlechterung der Qualität der Befunde. Als das Projekt 2001 für erfolgreich abgeschlossen erklärt wurde, waren die Daten tatsächlich noch voller Lücken und Fehler. Entsprechend wurden die Untersuchungen auch nach deren offiziellem Abschluss weitergeführt und im Herbst 2004 zum zweiten Mal für abgeschlossen erklärt.

Die Diagnose ist klar: Der Eintritt einer privaten Firma in das Projekt hat zu einer drastischen Qualitätssenkung der Forschungsergebnisse geführt. Schnelligkeit ging vor Zuverlässigkeit. Aber diese Absenkung war allem Anschein nach nicht allein eine Folge des Nutzungsdrucks, sondern eher des Strebens nach medialer Sichtbarkeit. Die Firma wollte ihr öffentlichkeitswirksames Überflügeln des Standardprogramms als Marketingstrategie nutzen und damit ihre anderen Produkte besser verkaufen. Mit den Genomdaten selbst war dagegen wegen deren Fehlerhaftigkeit wenig anzufangen. Das Beispiel stützt die Vermutung, dass der Anwendungsdruck allein die Zuverlässigkeit der Resultate noch keineswegs untergräbt.

entgegengesetzte Vermutung der Erhaltung oder Steigerung der Vertrauenswürdigkeit. Ähnlich konträre Erwartungen finden sich hinsichtlich der Oberflächlichkeit oder umgekehrt des Tiefgangs angewandter Forschung.

So sieht der Geschichtsphilosoph Robin Collingwood bereits 1940 eine pragmatische Zugangsweise durch die starke Verengung des Erkenntnisinteresses charakterisiert. Das praktische Wissen setzt einseitig auf die Kenntnis isolierter, voraussetzungsgebundener Ursache-Wirkungs-Beziehungen und bleibt durch Ausblenden des weiteren kausalen Kontexts flach und seicht.

Wenn ich finde, dass ich durch bestimmte Mittel ein Ergebnis erzielen kann, dann mag ich mir darüber im Klaren sein, dass ich es nicht erzielt hätte, wenn nicht eine große Zahl von Bedingungen erfüllt wäre. Aber solange ich das Ergebnis erziele, kümmere ich mich nicht darum, welches diese Bedingungen sind. Und wenn sich eine von ihnen ändert und das Ergebnis daraufhin ausbleibt, dann will ich immer noch nicht wissen, was alle diese Bedingungen sind. Ich will nur die eine kennen, die sich geändert hat (Collingwood in: Fox Keller 2000, 142).

Die „praktischen Wissenschaften“ sind danach durch einen verengten Fokus gekennzeichnet. Erkenntnis wird nur insoweit angestrebt, wie sie für das Erreichen des praktischen Handlungszwecks unerlässlich ist. Dabei wird vorausgesetzt, dass erfolgreiche Intervention auf einer derart bruchstückhaften Wissensbasis zuverlässig möglich ist. Eine technologische Praxis muss sich danach nicht auf ein Verständnis der zugrunde liegenden Zusammenhänge stützen.

Umgekehrt steht Francis Bacon seit 1620 als Kronzeuge für die These, dass praktische Erfolge auf theoretischer Durchdringung beruhen. Experimente, die auf schnelle Nutzenmehrung gerichtet sind, verfehlen ihr Ziel; Macht über die Naturumstände gewinnt man allein durch Erkenntnis des zugrunde liegenden Ursachengefüges. Zuerst müssen die lichtbringenden Versuche ausgeführt werden, dann die fruchtbringenden (Bacon 1620, p. 23–25, I.§99). Bacon begründet damit eine bis heute verbreitete Denkschule, die systematisch betriebene Grundlagenforschung als unabdingbare Voraussetzung erfolgreicher Technologieentwicklung betrachtet. Nach diesem heute so genannten *Kaskadenmodell* (oder auch „linearen Modell“) greift angewandte Forschung für die Lösung praktischer Aufgaben stets auf Grundlagenforschung zurück. Das Wissen fließt gleichsam ausschließlich von den Grundlagen zu den Vorrichtungen und Verfahren, sodass sich die Kenntnis der Naturprozesse in technischen Anlagen und Geräten niederschlägt. Der erfolgreiche Eingriff in den Naturlauf setzt das theoretische Eindringen in die zugrunde liegenden Naturzusammenhänge voraus (Bacon 1620, p. 65, I.§3, I.§110, I.§117, I.§129).

Dieses traditionelle Verständnis ist auf einflussreiche Weise in dem Bericht Vannevar Bushs an den amerikanischen Präsidenten Franklin D. Roosevelt aus dem Jahre 1945 niedergelegt. Bush sollte über den Beitrag der Wissenschaft zur Verbesserung der menschlichen Lebensbedingungen in der Nachkriegsära berichten und rückte dafür die Grundlagenforschung ins Zentrum. Erfolge in praktisch relevanten Fragen wie der Bekämpfung von Krankheiten oder technologischen Innovationen seien allein durch einschlägige Grundlagenforschung zu erzielen. Dafür werden zwei Gründe geltend gemacht. Erstens kann sich die Lösung eines praktischen Problems gerade als unerwartete Konsequenz einer scheinbar entlegenen Grundlageneinsicht ergeben und ohne diese nicht zu erreichen sein. Zweitens stammen innovative praktische Lösungen oft aus der neuartigen Kombination von Prinzipien. Technologische Neuerungen bringen nicht selten bekannte physikalische Gesetzmäßigkeiten auf eine zuvor nicht geläufige Weise zum Tragen. Aus diesen beiden Gründen sind die theoretischen Ressourcen zur Lösung einer technologischen Herausforderung vorab nicht klar anzugeben. Der praktische Erfolg kann sich vielmehr auf Forschungsergebnisse stützen, die zunächst keine Beziehung zu dem fraglichen Problem zu besitzen schienen. Die Schlussfolgerung liegt auf der Hand: Wenn man nützliches Wissen gewinnen will, so empfiehlt es sich in der Regel nicht, direkt zu den entsprechenden praktischen Fragen zu forschen; stattdessen sollte im zugehörigen Sachbereich breit angelegte Grundlagenforschung betrieben werden. Dadurch häuft man das Forschungskapital auf, dessen Zinsen sich im zweiten Schritt in praktischen Innovationen niederschlagen, die den technischen und gesellschaftlichen Fortschritt befördern (Bush 1945).

Der Bush-Report hat noch einmal nachdrücklich den Akzent auf das Kaskadenmodell gesetzt und in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg das Verständnis des Verhältnisses von Grundlagen- und Anwendungsforschung in Öffentlichkeit und Politik geprägt (Stokes 1997, 45–55). Technologische Innovation beruht auf wissenschaftlichen Neuerungen, und die Gewinnung konkreter Aussagen oder theoretischer Modelle für technische Anlagen und Verfahren kann sich auf wissenschaftliche Grundsätze stützen. Tatsächlich geht angewandte Wissenschaft nicht selten auf diese Weise vor. In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine große Zahl technologischer Neuentwicklungen durch die Verdichtung des theoretischen Verständnisses zu praktisch fassbaren Konsequenzen erreicht. Zum Beispiel verläuft die zunehmende Miniaturisierung von elektronischen Schaltkreisen unter der starken konzeptionellen Prägung von Theorien der Optik und Festkörperphysik. Ebenso beruhen die optoelektronischen Innovationen der Gegen-

wart (wie optische Schalter oder die erwähnten neuartigen Leuchtdioden) auf der zuvor ungeläufigen Kombination bekannter physikalischer Prinzipien. In die gleiche Richtung weist die verbreitete Diagnose der Gründe für das Scheitern des amerikanischen konzertierten Forschungsprogramms zur Krebsbekämpfung aus dem Jahre 1971. Nach dem Vorbild des Manhattan-Projekts und des Apolloprogramms sollte mit einer detailliert ausgearbeiteten Abfolge von Forschungsprojekten die Prävention und Therapie von Krebs umfassend in Angriff genommen werden. Der Fehlschlag dieser Forschungsanstrengungen wird im Rückblick darauf zurückgeführt, dass das für die systematische Entwicklung von Anwendungen erforderliche Grundlagenwissen noch nicht zur Verfügung stand (Hohlfeld 1979, 211–212).

#### 4. Der Emergentismus und die Eigenständigkeit angewandter Forschung

In der Sichtweise des Kaskadenmodells bildet die Grundlagenforschung die Voraussetzung einer anhaltend erfolgreichen Praxis technischer Innovation. Grundlagenforschung geht danach der Anwendungsforschung sowohl sachlich als auch zeitlich voran; jene bildet den Nährboden für diese, sodass die Konzentration auf bloß praktische Aufgaben bedeutete, gleichsam das Saatkorn zu verzehren und dadurch die künftige Ernte zu dezimieren. Oberflächliche und unverstandene Erfahrungsbeziehungen sind danach als Basis einer Technologieentwicklung untauglich. Angewandte Forschung drängte aus eigenem Anwendungsinteresse heraus auf epistemisch gehaltvoll angelegte Grundlagenforschung.

Aber das Kaskadenmodell ist in Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaft stark umstritten. Es wird von der Vorstellung getragen, dass Grundlagenkenntnis tatsächlich bis zur Ebene der konkreten Phänomene reicht und für deren Kontrolle von Belang ist. Dem stehen „anti-fundamentalistische“ oder „emergentistische“ Positionen entgegen, die eine stärkere Abgegrenztheit von Erfahrungsbereichen behaupten und die Wissenschaften von einer Mehrzahl gleichsam neben einander stehender, von einander unabhängiger Theorien oder Gesetzessysteme bestimmt sehen. Zum Beispiel bringt Nancy Cartwright einen Primat des Besonderen gegenüber dem Allgemeinen zum Tragen und vertritt die Ansicht, dass höherstufige Theorien nur von begrenzter Tragweite für die Erfassung und Darstellung konkreter Phänomene sind. Für Cartwright sind die Gesetze der Physik so stark idealisiert, dass sie den Zugriff auf weite Teile der physikalischen Welt verfehlen. Cartwright stützt sich dafür unter anderem auf ein Beispiel Otto Neuraths, der auf das peinliche Schweigen aufmerksam gemacht hatte, das die New-

tonsche Mechanik in der Frage befällt, an welcher Stelle ein Geldschein zur Ruhe kommt, der auf dem Wiener Stephansplatz vom Wind davongetragen wird (Cartwright 1994, 318).

Cartwright sieht ihre These von der Impotenz umfassender Theorien durch den Umstand gestärkt, dass die empirische Leistungsfähigkeit von Modellen häufig nicht dadurch gesteigert wird, dass man theoriegestützte Korrekturen hinzufügt oder andere Einzelheiten berücksichtigt, die von der Theorie nahe gelegt werden. Stattdessen erreicht man eine solche Verbesserung der empirischen Passung eher durch Rückgriff auf theoretisch unfundierte Näherungen, Hilfsannahmen und Korrekturen. Wenn man einen Laser herstellt oder komplizierte Verstärkerschaltungen baut, dann sind wichtige Konstruktionsmerkmale von den betreffenden theoretischen Rahmenwerken unabhängig. Wesentliche Bestimmungsstücke solcher Modelle sind nicht durch die grundlegenden Theorien der betreffenden Disziplin festgelegt, sondern Ergebnis von Plausibilitätsabschätzungen, Ad-hoc-Anpassungen und Daumenregeln. Als „*phänomenologisch*“ sollen solche Modelle bezeichnet werden, bei denen die Erklärungslast von problemspezifischen Annahmen getragen wird, nicht von übergreifenden Theorien. Phänomenologische Modelle sind weitgehend von den jeweiligen Besonderheiten der Erfahrungssituation geprägt, nicht von deren verallgemeinerungsfähigen, den Einzelfall überschreitenden Merkmalen (Cartwright 1983, Kap. 2–3, 6, 8; Cartwright 1997, 1998; vgl. Ramsey 1997).

In Cartwrights Vorstellung einer gleichsam gescheckten Wirklichkeit (*dappled world*) dominiert das Besondere vor dem Allgemeinen, und die einzige Möglichkeit, der Phänomene habhaft zu werden, besteht in der Angabe phänomenologischer Modelle, die ohne enge theoretische Bindungen durch die jeweilige besondere Problemstellung und die im Einzelfall vorliegenden Sachumstände geprägt werden. Nur gleichsam kleinformatige Erklärungen sind genügend passgenau für einen präzisen Zugriff auf die Phänomene; großformatige, übergreifende Theorien verlieren den Kontakt zu den konkreten Erfahrungen. Der Flickenteppich, nicht die Pyramide, ist das Symbol für die Beschaffenheit wissenschaftlichen Wissens (Cartwright 1994, 322–323).

Tatsächlich lassen sich das Kaskadenmodell und der emergentistische Ansatz in naturphilosophische Traditionen einbetten. Das Kaskadenmodell ist mit einer Platonistischen Ansicht von der Tragweite grundlegender Naturgesetze verknüpft. Das Universelle durchdringt die Gesamtheit der Natur. Der Emergentismus schließt sich umgekehrt an die Aristotelische Auffassung vom Primat des Besonderen an. In diesem Rahmen wird die Einzigartigkeit jedes Einzelfalls hervorgehoben; deren Spezifika übertreffen

die Gemeinsamkeiten. Der Eigenschaftsfülle der Einzelereignisse nähert man sich nur durch eine Vielzahl eingegrenzter Beschreibungsansätze, die gleichsam auf eigenen Füßen stehen und nicht auf universelle Grundgesetze der Natur zurückgehen. Umfassende Theorieansätze verlieren die Verbindung zu den Phänomenen.

Diese Auffassung von der Uneinheitlichkeit von Welt und Wissen bleibt nicht ohne Folgen für die Einschätzung des Verhältnisses von Grundlagen und Anwendungen. Die emergentistische Position soll durch die Behauptung charakterisiert werden, wichtige oder zentrale Charakteristika technologisch relevanter Verfahren seien nicht aus dem theoretischen Rahmen zu erschließen, sondern ergäben sich erst aus Anpassungen, die sich exklusiv auf Erfahrungen mit dem direkt einschlägigen Phänomenbereich stützen. Diese Charakterisierung lässt Raum für eine begrenzte Prägung konkreter Erklärungen durch übergreifende Theorien. Die Verpflichtung auf phänomenologische Modelle stellt dann eine extreme Form des Emergentismus dar.

Die Annahme einer emergentistischen Position hat spürbare Auswirkungen darauf, wie praktisch fruchtbare Forschungsanstrengungen am besten zu gestalten sind. Unterschiedliche Auffassungen von den methodologischen Charakteristika angewandter Forschung konkretisieren sich zu gegensätzlichen Vorstellungen von optimalen Forschungsheuristiken. Aus dem Blickwinkel des Emergentismus ist Grundlagenforschung für die Lösung praktischer Fragen von weit geringerer Relevanz, als im Rahmen des Kaskadenmodells vorgesehen, sodass der angewandten Forschung anzuraten ist, praktische Herausforderungen ohne den Umweg über fundamentale Erklärungsansätze anzugehen. Erkenntnisse über die Bausteine von komplex zusammengesetzten Objekten haben nur einen geringen Nutzwert für die Erklärung oder Vorhersage von Eigenschaften dieser Objekte. Da Grundlagentheorien in der Regel technologisch unfruchtbar bleiben, empfiehlt sich die Strategie: wenn man praktische Probleme lösen will, muss man zu praktischen Problemen forschen (Carrier 2004b, 282).

Wir stehen demnach vor zwei widerstreitenden Sichtweisen des Verhältnisses von Grundlagenforschung und angewandter Wissenschaft. Die Leitbilder der Kaskade und des Flickenteppichs beinhalten eine markant unterschiedliche Bewertung der Signifikanz fundamentaler Theorien für die Entwicklung praktisch nutzbarer Verfahren. Entsprechend sind die Empfehlungen für die Vorgehensweise angewandter Forschung deutlich verschieden.

## 5. Die Selbstaufhebung der praktischen Haltung

Die Haltung der „praktischen Wissenschaften“ in Collingwoods Sinn setzt auf Interventionsfähigkeit unter Absehen von epistemischer Durchdringung (s.o. Abs. 3). Dafür werden häufig *kontextualisierte Kausalbeziehungen* herangezogen, also stark voraussetzungsgebundene Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, die unter „typischen“ Situationsumständen zum Tragen kommen und keinen Mechanismus der Kausalverknüpfung spezifizieren. Eine kontextualisierte Kausalbeziehung aus dem Alltagsleben lautet: „Durch Drehen des Zündschlüssels startet man den Motor“. Diese Wirkung tritt allerdings nur dann ein, wenn sich das kausale Umfeld in einem ordnungsgemäßen Zustand befindet. Die Drehung des Zündschlüssels schließt zunächst nur einen Stromkreis, der seinerseits eine Zahl von Prozessen anstößt, die vom Ansaugen des Treibstoffs über das Funkensprühen der Zündkerzen bis zur Umsetzung linearer Kolbenbewegungen in einen Rundlauf des Getriebes reichen. Diese zusätzlichen Erfordernisse lässt die genannte Kausalverknüpfung unerwähnt; sie sind stillschweigend einbezogen. Die Zündschlüsseldrehung ist für sich genommen keineswegs hinreichend für den Start des Motors. Sie ist lediglich ein Auslöser oder „Trigger“ des Motorenstarts.

Kontextualisierte Kausalbeziehungen können Teil phänomenologischer Modelle sein. Solche Beziehungen stoßen dann an ihre Geltungsgrenzen, wenn eine dieser ungenannten Voraussetzungen nicht erfüllt ist. Bei nassen Zündkerzen nützt alles Drehen des Zündschlüssels nichts. Überdies tragen kontextualisierte Kausalbeziehungen nichts zur Aufklärung des Zusammenhangs zwischen Ursache und Wirkung bei. Sie liefern kein Verständnis der zugrunde liegenden Ereignisverkettungen und Kausalprozesse.

Im Verlauf der letzten beiden Jahrzehnte haben sich die sog. Lebenswissenschaften zu einem Schwerpunkt angewandter Forschung entwickelt. Eine führende Rolle spielt dabei die Gentechnik. Charakteristisch für diese ist die Annahme einer festen und eindeutigen Verknüpfung von Gen und organismischem Merkmal oder zwischen Gen und Protein. Auf der Grundlage solcher Verknüpfungen nährt die Gentechnik die Hoffnung oder Furcht gezielter Eingriffe in das Lebensgeschehen, die ihrerseits zuvor ungeahnte Optionen für die Therapie von Krankheiten eröffnen sollen.

Ein Beispiel für eine kontextualisierte Kausalbeziehung, die als Grundlage gentechnischer Eingriffe taugt, ergibt sich aus der Identifikation von „Eyeless“, dem sog. Mastergen der Augenentwicklung. Dieses Eyeless-Gen tritt bei *Drosophila* auf, der gemeinen Taufliege, besitzt aber auch bei Maus und Mensch homologe Gegenstücke. Eyeless steuert die Morphoge-

nese von Fliegenaugen; Mutationen mit Funktionsverlust behindern oder verhindern deren Ausbildung. Die zunächst missverständliche Bezeichnung „Eyeless“ stammt aus dieser Verknüpfung von Funktionsverlust und Gendefekt und folgt einer allgemeinen Bezeichnungskonvention der Molekulargenetik. Wird das homologe Mäusegen durch gentechnische Manipulation in *Drosophila* zur Expression gebracht, so induziert es die Bildung von Komplexaugen wie bei der Fliege, nicht von Linsenaugen wie bei der Maus.

Die Expression von Eyeless reicht hin, um in einem geeigneten Gewebeumfeld Augen entstehen zu lassen. Durch künstliche Stimulation von Eyeless kann man Augen in Beinen oder Flügeln von Fliegen erzeugen – und deshalb gilt Eyeless als Mastergen der Augenentwicklung. Gleichwohl gibt Eyeless nur das Startsignal für eine Genkaskade, die mehrere tausend weitere Gene umfasst und die erst in ihrer Gesamtheit die Augenmorphogenese steuert. Dies zeigt sich bereits an dem erwähnten Umstand, dass das homologe Mäusegen in Fliegengewebe die Bildung von Fliegenaugen in Gang setzt. Eyeless ist ein Auslöser, der für seine Wirksamkeit des richtigen kausalen Umfelds bedarf und ohne dieses folgenlos bleibt (Fox Keller 2000, 96–97).

Seiner kausalen Rolle nach ist Eyeless dem Zündschlüssel vergleichbar. Denn wenn man ein Zündschloss aus einem rassigen Sportwagen ausbaut und in einen schwerfälligen Lastwagen einsetzt, dann wird die Drehung des Zündschlüssels den Lastwagenmotor in Gang setzen, nicht den Sportwagen.

Im gegenwärtigen Zusammenhang besteht der springende Punkt darin, dass die technische Manipulation von Eyeless die Steuerung der Augenmorphogenese ermöglicht, ohne dass die zugrunde liegenden Prozesse entschlüsselt und theoretisch verstanden wären. Eingriffsoptionen können sich dem Anschein nach auf kontextualisierte Kausalbeziehungen stützen und bedürfen nicht des Verständnisses der zugehörigen Verursachungsketten. In den 1990er Jahren wurden auf derartige Beobachtungen Urteile des Inhalts gestützt, die Biotechnologie verfähre oftmals unabhängig von der Biowissenschaft. Die Behauptung lautete, der Umbruch der Lebenswissenschaften von der Genomik zur Proteomik bleibe ohne Folgen für die Biotechnologie. Die Genomik war danach von der Vorstellung des genetischen Determinismus beherrscht, demzufolge die Grundkonstitution einer Zelle durch deren Gene fixiert ist. Dagegen rückte die Proteomik die Tatsache in den Mittelpunkt, dass viele Zelleigenschaften Ergebnis der verwickelten Wechselwirkung von Proteinen sind. Zwar sind Proteine Genprodukte, unterliegen aber gleichwohl eigenen Regularitäten, welche nicht im Genom



der betreffenden Zelle niedergelegt sind. Prinzipielle Beschränkungen der Tragweite des Genoms ergeben sich dabei daraus, dass äußere Faktoren, die entsprechend dem Einfluss des genetischen Codes einer Zelle entzogen sind, über die Expression von Genen dieser Zelle entscheiden können. In diesem Übergang zur Proteomik sieht der Biologe Richard Strohman eine „kommende Kuhnsche Revolution“ (Strohman 1997, 194). Ähnlich ist für Evelyn Fox Keller das 20. Jahrhundert das Säkulum des Gens und entsprechend bereits abgelaufen. Der Grund für diesen Abgesang ist, dass der Graben zwischen genetischer Information und biologischer Funktion nunmehr deutlich zutage getreten sei (Fox Keller 2000, 8).

Einer der Gründe für die vorgenannte Unabhängigkeitserklärung der Biotechnologie von der Biowissenschaft besteht in der Beobachtung, dass die Einsicht in die begriffliche und theoretische Unzulänglichkeit der Genomik zunächst mit einem pragmatischen Festhalten am Genbegriff einherging. Durch die feste Verknüpfung von Gen und Zelleigenschaft bietet sich das Gen als „Handgriff“ für die biologische Intervention an. Danach lassen sich durch Eingriffe auf der genetischen Ebene reproduzierbar Wirkungen erzeugen, auch wenn die Verlässlichkeit der zugehörigen Kausalbeziehungen auf spezifische Voraussetzungen eingegrenzt bleibt (Fox Keller 2000, 141–142). Obwohl Biotechnologen die Fragwürdigkeit des genetischen Determinismus in der Biowissenschaft anerkannten, wollten sie verbreitet in den 1990er Jahren in technologischen Kontexten an diesem festhalten. Die Annahme eines engen Zusammenhangs von Gen und Zelleigenschaft sollte, obgleich sachlich ohne Berechtigung, einen Hebel für die Öffnung der Black Box des Lebens bereitstellen. Trotz aller wissenschaftlichen Einschränkungen eignen sich Gene als Werkzeuge, um Zellen (und damit letztlich Organismen) mit spezifischen Eigenschaften zu erzeugen. Aus biotechnologischem Blickwinkel ist aber allein eine derartige Herstellung wirksamer Produkte von Belang, und dazu bedarf es der Identifikation von Schaltern, Hebeln und Handgriffen, nicht aber wissenschaftlicher Wahrheiten über die zugrunde liegenden Prozessverläufe (Bains 1997).

Gemeinsames Element dieser Urteile ist die Auffassung, Biotechnologie könne sich auf kontextualisierte Kausalbeziehungen stützen, deren Adäquatheit und Tauglichkeit weitgehend unabhängig von ihrer Rückführung auf tiefer reichende Theorien sind. Insbesondere ist danach der erfolgreiche technische Eingriff nicht auf die Entschlüsselung der zugehörigen Kausalmechanismen angewiesen. Das Interventionsvermögen kann auch ohne Erkenntnisorientierung gesichert und gesteigert werden.

Aber obgleich solche Äußerungen erst vor wenigen Jahren gefallen sind, spiegeln sie in keiner Weise mehr den Zustand der Biotechnologie wider.

Die Proteomik ist auch in technologischer Hinsicht allerorten Trumpf; auf diese konzentrieren sich auch die angewandten Forschungsanstrengungen. Wesentlich ist insbesondere die Genregulation, also die Steuerung der Expression von Genen. Gene werden nur dann in Proteine umgesetzt, wenn sie eingeschaltet sind, und dieses Erfordernis bringt eine Fülle zusätzlicher Kausalfaktoren zum Tragen. Die Proteinsynthese in der Zelle ist Resultat eines komplexen kausalen Netzwerks, von dem die Kausalkette von der Zell-DNA zum Protein nur einen Ausschnitt darstellt. Die Konzentration auf diesen Partialprozess ist gleichbedeutend mit der Beschränkung auf eine kontextualisierte Kausalbeziehung als Basis des technischen Eingriffs. Die Entwicklung der Biotechnologie der vergangenen zehn Jahre ist durch den Einbezug dieses kausalen Umfelds, also der Genexpression und ihrer Steuerung, charakterisiert und legt dadurch Zeugnis von der Untauglichkeit kontextualisierter Beziehungen als Grundlage nachhaltiger technologischer Innovation ab. Der Anspruch, Können von Wissen abzukoppeln, hat sich in diesem Fall als voreilig und verfehlt erwiesen. Die anfänglichen Deklarationen des Vorrangs einer exklusiv pragmatischen, allein auf Interventionsvermögen setzenden Zugangsweise heben sich vor dem Hintergrund der nachfolgenden biotechnologischen Entwicklung selbst auf. Die Preisgabe des wissenschaftlichen Erklärungsanspruchs mündet in technologisches Versagen.

## 6. Die Ohnmacht der Grundlagentheorie

Aber ganz so eindeutig sind die Zusammenhänge doch nicht. Andere Beispiele stützen andere Schlussfolgerungen. Der Wechsel der Gezeiten stellt ein Beispiel dafür bereit, dass die Grundlagentheorie aufgrund der komplexen Verwicklung von Einflussfaktoren aussagekräftige Ergebnisse über die Einzelheiten eines Phänomens verfehlen mag. Der Gezeitenmechanismus wurde im Grundsatz bereits Ende des 17. Jahrhunderts durch Isaac Newton erklärt. Ebbe und Flut gehen danach darauf zurück, dass das Wasser der Ozeane wegen der unterschiedlichen lunaren Gravitationsanziehung an der mondzugewandten Seite stärker und an der mondabgewandten Seite schwächer angezogen wird als der Erdkörper im Mittel. Dadurch entstehen zwei Flutberge, unter denen die Erde in täglicher Rotation umläuft. Ein gleichartiger, aber weniger markanter Effekt entsteht durch den Schwerkreeinfluss der Sonne. Hinzu tritt die sog. Corioliskraft, die eine Folge der Erddrehung ist und Nord-Süd-Strömungen seitwärts ablenkt. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurde daraus die Schlussfolgerung gezogen, dass Gezei-

tenströme (wie atmosphärische Drucksysteme) von kreisförmiger Gestalt sind.

Damit ist die theoretische Analyse im Wesentlichen an ihr Ende gelangt. Die Besonderheiten der Küstenformen, Wassertiefen und sonstigen Meeresströmungen lassen kaum einen weiteren theoretischen Zugriff auf die relevanten Einzelheiten zu. Insbesondere ist es nicht möglich, den Tidengang in einem Meeresgebiet oder für einen bestimmten Hafen aus den physikalischen Grundsätzen und den zugehörigen geografischen Randbedingungen abzuleiten. Stattdessen wird bis zum heutigen Tag ein von Lord Kelvin Ende des 19. Jahrhunderts entwickeltes empirisches Verfahren zur Vorhersage der Gezeiten herangezogen, das sich auf die sog. Fourier-Analyse stützt. Danach werden die unregelmäßigen Tiden, wie sie an einem bestimmten Ort auftreten, über längere Zeiträume hinweg beobachtet und die Oszillationen in sinusförmige, sog. harmonische Teilschwingungen zerlegt. Diese Teilschwingungen lassen sich wegen ihrer Regelmäßigkeit einfach fortsetzen und schließlich wieder zu einem unregelmäßigen Gesamtverlauf zusammensetzen (Fourier-Synthese) (Sauer 2004; vgl. Mill 1881, 309–314).

Aus diesem Beispiel ergibt sich folgendes Bild. Alle Kausaleinflüsse, die den Verlauf der Gezeiten festlegen, sind bekannt – ebenso wie sämtliche relevanten Sachumstände (wie der Verlauf von Küste und Meeresboden). Jedoch ist das Zusammenspiel aller dieser Faktoren so komplex, dass nur die hervorstechenden Eigenschaften des Gezeitenwechsels durch die theoretischen Prinzipien abgedeckt werden können. Praktische Aufgaben, diejenigen Herausforderungen, die sich für Schiffe, Häfen und Küstenbewohner stellen, sind dagegen nur mit genaueren Daten zu bewältigen. Solche Daten beschafft man sich rein empirisch, durch Parameteranpassung und ohne theoretische Durchdringung der Sachlage. Die Modelle für Tidenströmungen sind demnach durch Beobachtungen vor Ort dominiert und bleiben unabhängig von theoretischen Grundsätzen. Gezeitenvorhersagen für einen besonderen Hafen stützen sich auf die lokalen Beobachtungen und schreiben im Kern vergangene Regularitäten in die Zukunft fort (wenn auch mittels avancierter mathematischer Analyseinstrumente). Es handelt sich um phänomenologische Modelle.

Die Analyse und Vorhersage der Gezeiten zeigt die Ohnmacht der Grundlagentheorie. Sämtliche einschlägigen Gesetzmäßigkeiten und alle Kausaleinflüsse und Sachumstände der Gezeiten sind bekannt, aber deren Zusammenspiel ist so verwickelt, dass die praktisch relevanten Fragen allein mit Hilfe phänomenologischer Modelle bewältigt werden können. Solche Modelle werden unter höchstens randständiger Mitwirkung der Theorie gebildet und sind stattdessen von lokalen Messergebnissen geprägt. Ent-

sprechend sind diese Modelle nicht verallgemeinerbar, sondern bleiben auf die örtlichen Umstände beschränkt. Die Grundlagentheorie scheitert hier aufgrund der Komplexität der Sachbedingungen. Die Bewältigung praktischer Aufgaben hat von der kausalen Erschließung nicht profitiert.

## 7. Das Verhältnis von Nutzbarkeit und Richtigkeit

Das Kaskadenmodell sieht in der epistemischen Durchdringung von Sachverhalten die Grundlage aller praktischen Innovation. Damit ist nicht bloß gemeint, dass Irrtümer über die jeweiligen Zusammenhänge und Fehleinschätzungen der betreffenden Phänomene die Nutzung behindern. Es geht nicht allein um die Korrektheit der herangezogenen empirischen Regularitäten. Es versteht sich ohnedies, wer meint, der Mensch brauche weder Speis noch Trank, oder Wasser habe Balken, wird schnell auf den Boden der Tatsachen zurückgeholt werden. Das Kaskadenmodell zielt stattdessen weitergehend auf die Unerlässlichkeit der theoretischen Erschließung der Phänomene. Im Zentrum steht der Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit empirischer Verallgemeinerungen und dem Verständnis der zugrunde liegenden Eigenschaften und Prozesse. Das Kaskadenmodell besagt, dass die Gewinnung praktisch relevanten Wissens die Eingliederung der betreffenden Verallgemeinerungen in das Erkenntnisgebäude der Wissenschaft oder die Entschlüsselung der zugehörigen Kausalmechanismen verlangt. Theoretische Vereinheitlichung oder Kausalanalyse ist die Basis erfolgreicher Intervention.

Aber so einfach liegen die Dinge nicht. Kontextualisierte Kausalbeziehungen sind zumindest zeitweise erfolgreich. Werden etwa die Geltungsgrenzen kontextualisierter Beziehungen zwischen Genen und Zelleigenschaften anerkannt, dann können solche Zusammenhänge durchaus praktisch fruchtbar werden (s.o. Abs. 5). Erst recht stellt die Gezeitenvorhersage auf der Basis phänomenologischer Modelle und empirischer Anpassungen außer Zweifel, dass sich die Kontrolle oder Nutzbarkeit eines Effekts und die Korrektheit seiner theoretischen Durchdringung jedenfalls nicht stets wechselseitig bedingen.

Beispiele dieser Art stützen das emergentistische Modell. Für dieses spricht auch, dass, anders als im Kaskadenmodell vorgesehen, eine große Zahl von unverstandenem oder falsch verstandenen Verfahren ausgezeichnet funktioniert. Die Impfung gegen Pocken mit dem Kuhpockenerreger war zwischen Edward Jenner und Louis Pasteur (oder noch über diesen hinaus) ebenso wirksam wie unerklärlich. Aspirin wurde ein volles Jahrhundert lang nutzbringend medizinisch eingesetzt, bevor vor einigen Jahren der

Wirkmechanismus entschleiert wurde. Zudem hat dieser Erklärungserfolg keineswegs zur Erhöhung der Wirksamkeit des Medikaments beigetragen. Die ersten Überschallflugkörper wurden Ende der 1940er Jahre ohne theoretische Anleitung und gegen die theoriegestützte Erwartung gebaut, der Luftwiderstand solle bei Überschreiten der Schallgeschwindigkeit so stark anwachsen, dass ein stabiler Flugbetrieb ausgeschlossen sei. Die Konstruktion stützte sich stattdessen auf praktische Erfahrungen im Unterschallbereich (Vincenti 1997, 821–823). Bis heute sind der theoretischen Erfassung von praktisch relevanten aero- und hydrodynamischen Effekten enge Grenzen gesetzt. So wurde 2004, veranlasst durch die Beobachtung von Walen, die Erkenntnis gewonnen, dass ein Tragflächenprofil mit gewellten Kanten den Auftrieb erhöht und den Luftwiderstand senkt, ohne dass Klarheit über die Ursache dieser verbesserten Wirksamkeit bestünde. Insgesamt können auch irrige theoretische Vorstellungen in technologischer Hinsicht Frucht tragen (Polanyi 1962, 183) und technologische Erfolge auch ohne theoretische Anleitung erzielt werden. Die Tüftler-und-Bastler-Mentalität des Erfinders bildet gleichsam die extreme Gegenposition zum Kaskadenmodell; das Probieren ersetzt dann zur Gänze das Studieren. Resultat ist, dass nicht in jedem Fall erst wissenschaftliches Verständnis die praktische Nutzung ermöglicht.

Solche Beobachtungen können als Herausforderung begriffen werden, den Anwendungsbereich des Kaskadenmodells zu begrenzen und Raum für das emergentistische Modell zu schaffen. Danach bedürfte angewandte Forschung zum Teil der Grundlagenerkenntnisse, zum Teil ginge angewandte Forschung unabhängig von solchen Wissensimporten gleichsam auf eigene Rechnung vor. Ein erster Versuch einer solchen Begrenzung könnte vorsehen, das Kaskadenmodell auf fortgeschrittene Technologien oder komplizierte Nutzungen zu beschränken, während im niedertechnologischen Bereich phänomenologische Modelle, schematische Durchmusterungen oder Versuch und Irrtum die Mittel der Wahl bildeten. Dafür spricht zum Beispiel die Beobachtung, dass die von der Dampfmaschine ausgehende erste industrielle Revolution im 18. Jahrhundert ohne spürbare Beteiligung der Wissenschaft ablief, während sich die von chemischen und elektrischen Verfahren stimulierte zweite industrielle Revolution am Ende des 19. Jahrhunderts stark auf die Wissenschaft stützte (Stokes 1997, 33–35).

Aber eine solche Einschränkung reichte nicht hin. Auch in komplexen Zusammenhängen lassen sich nämlich unter Umständen praktische Erfolge ohne wissenschaftliche Durchdringung oder mit explizit unrealistischen theoretischen Mitteln erzielen. Die physikalische Grundlage der Zirkulationsdynamik der Erdatmosphäre bildet ein System von Differentialglei-

chungen aus Aero- und Thermodynamik, das jedoch nicht allgemein lösbar ist. Die Modellierung dieser Dynamik verlangt stattdessen die Diskretisierung der Gleichungen, also die Berechnung der Funktionswerte für eine Zahl von Gitterpunkten. Durch diese Diskretisierung entstehen Fehler, die durch Einführung zusätzlicher Mechanismen beseitigt werden müssen. Akio Arakawa gelang 1966 eine empirisch adäquate numerische Lösung der physikalischen Basisgleichungen der Atmosphärendynamik durch Einführung von Postulaten, deren Falschheit nicht zweifelhaft war. Arakawa ging etwa von der Erhaltung der kinetischen Energie in der Atmosphäre aus, obwohl offenkundig war, dass sich die kinetische Energie von Luftströmungen in Wärme umwandelt. Das Verfahren griff also auf explizit unrealistische theoretische Mittel zurück (Küppers & Lenhard 2005).

Ähnlich kontrafaktische Annahmen spielen bei der Modellierung von Schockwellen eine wichtige Rolle. Die Beherrschung von Schockwellen ist von großer praktischer Bedeutsamkeit und entsprechend Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen der angewandten Wissenschaft. Schockwellen beinhalten eine abrupte Änderung der einschlägigen Kenngrößen, die durch die diskretisierten Fassungen der aero- oder hydrodynamischen Gleichungen nicht adäquat wiedergegeben werden können. Daher führt man eine „künstliche Viskosität“ ein, die im Modell Schockfronten verbreitert und Schwingungen dämpft und auf diese Weise eine numerische Lösung ermöglicht. Dieser zusätzliche Einflussfaktor ist anerkanntermaßen unrealistisch, da er die Energieerhaltung verletzt (Winsberg 2003, 107–109).

In solchen Fällen handelt es sich um eine *instrumentalistische Modellierung*. Eine praktische Handhabung der Phänomene wird durch Grundsätze erreicht, von denen bekannt ist, dass sie falsch sind und dass sie – anders als Idealisierungen – auch nicht näherungsweise zutreffen. Daneben treten Beispiele von Parameteranpassungen in Modellen. Solche *lokalen Modelle* sind zwar ihrer Anlage nach durch Naturgesetze und übergreifende Theorien geprägt, bedürfen aber bei ihrer praktischen Umsetzung der Vervollständigung durch Angaben, die nur aus den Daten zu ermitteln sind. Lokale Modelle sind durch ihren schmalen Anwendungsbereich und durch ihre Abhängigkeit von gleichsam kleinformartigen Anpassungen an die jeweiligen Erfahrungsbedingungen gekennzeichnet. Lokale Modelle können zwar nicht aus Theorien abgeleitet werden, sind aber begrifflich stärker durch Theorien strukturiert als phänomenologische Modelle (s.o. Abs. 4). Die Eigenschaften lokaler Modelle in der angewandten Forschung lassen sich am Beispiel des 1988 entdeckten Riesenmagnetowiderstands vor Augen führen.

Dabei geht es darum, dass der elektrische Widerstand einer spezifischen Anordnung aus ferromagnetischen Halbleiterschichten und nicht-ferromagnetischen Leitern in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Magnetisierung der ferromagnetischen Schichten vergleichsweise großen („riesigen“) Schwankungen unterliegt. Diese Magnetisierungsrichtung kann durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst werden, sodass der elektrische Widerstand des Systems von einem solchen Feld abhängt. Solche Vorrichtungen zeigen daher Magnetfelder an und werden heute als Leseköpfe für Computerfestplatten eingesetzt. Dabei wird die variable Magnetisierung von Festplattenbereichen in unterschiedliche Stromstärken umgesetzt.

Der für diesen Effekt verantwortliche Mechanismus war schnell deutlich. Ein stark theoriegeprägtes Modell für den Elektronentransport in Ferromagneten legte für ein geschichtetes System der skizzierten Zusammensetzung eine Abhängigkeit der Elektronenstreuung von der Orientierung des Elektronenspins zur Richtung der lokalen Magnetisierung nahe. Streuereignisse verursachen aber den elektrischen Widerstand, sodass sich der genannte Zusammenhang zwischen Magnetisierung und Widerstand ergibt. Qualitativ liegt dem Riesenmagnetowiderstand damit die theoretisch gut erfasste spinabhängige Streuung von Elektronen zugrunde, aber seine quantitative Ausprägung ist damit noch nicht bestimmt. Tatsächlich ist die Kenntnis quantitativer Abhängigkeiten gerade für die praktische Nutzung des Effekts unerlässlich. Wenn ein Lesekopf gebaut werden soll, dann muss der Einfluss von Schichtdicken, Stoffkonstanten, Temperaturschwankungen oder Änderungen des Magnetfelds genau bekannt sein. Diese Charakteristika konnten aber durch die theoretischen Modelle gerade nicht vorhergesagt werden; vielmehr handelt es sich um freie Parameter, die durch empirische Untersuchungen ermittelt werden mussten (Wilholt 2006, Abs. 2).

Solche lokalen Modelle stehen zwar innerhalb eines theoretischen Rahmens, erlauben aber nur dann konkrete, die praktische Nutzung stützende Aussagen, wenn die Werte der betreffenden Kenngrößen aus den Daten erschlossen werden. Die präzise Erfassung des Effekts ist nur durch situationsspezifische Anpassungen und Heranziehen theoretisch nicht bestimmter Sachumstände zu leisten. Die epistemische Durchdringung reicht zur Herstellung geeigneter Vorrichtungen gerade nicht hin (Carrier 2004c, 7–8).

Lokale Modellierungen stellen ein in der Industrieforschung verbreitetes Mittel des theoretischen Zugriffs dar. Durch die Theorienstützung solcher Modelle wird erreicht, dass erstens nicht sämtliche empirischen Zusammenhänge aus möglicherweise kostspieligen Messungen und umständlichen

Experimenten erschlossen werden müssen; einige dieser Zusammenhänge ergeben sich auf einfache und preisgünstige Weise durch Deduktion aus dem theoretischen Rahmen. Die Theorienstützung solcher Modelle erhöht zweitens deren Verallgemeinerbarkeit. Die Modellierung durch situationsspezifische Annahmen hilft nicht, wenn sich die Situation ändert. Die Gezeitenvorhersage durch phänomenologische Modelle muss für jeden Küstenstreifen und für jeden Hafen ganz von Anfang an erstellt werden. Die Identifikation situationsübergreifender Bestimmungsstücke fördert hingegen die Übertragung auf andersartige Sachverhalte. Unter „Robustheit“ soll die Stabilität oder Invarianz von Resultaten trotz Veränderung einschlägiger Umstände verstanden werden. „Epistemische Robustheit“ drückt dann diese Invarianz bei Variation der betreffenden Sachbedingungen aus. Die geringe Verallgemeinerungsfähigkeit phänomenologischer Modelle ist Anzeichen ihrer mangelhaften epistemischen Robustheit. Lokale Modelle zeichnen sich durch höhere epistemische Robustheit aus, markieren aber durch den Einbezug von situationsspezifischen Annahmen ebenfalls die Grenzen der Verallgemeinerungsfähigkeit und des theoretischen Zugriffs.

Das Auftreten von lokalen Modellierungen ist jedoch kein Alleinstellungsmerkmal angewandter Forschung; vielmehr greift auch epistemische Forschung vielfach darauf zurück (Carrier 2004c, 8–9). Oftmals stellen übergreifende Naturgesetze wie die Navier-Stokes-Gleichung der Hydrodynamik oder die Schrödingergleichung der Quantenmechanik keinen anschaulichen Zugang zu den Phänomenen. Lokale, an den Einzelfall angepasste Modelle füllen dieses Defizit durch den Einbezug von Faktoren, die zwar mit den Gesetzen verträglich sind, aber nicht von diesen spezifiziert werden. Die Navier-Stokes-Gleichung gewann erst Relevanz für die Phänomene, als Ludwig Prandtl 1904 Flüssigkeitsströmungen in Röhren in diskrete Bereiche verschiedener idealisierter Regime unterteilte, für die Lösungen der Navier-Stokes-Gleichung angegeben werden konnten, und die Gesamtlösung aus diesen Partialansätzen zusammenfügte. Diese Zugangsweise war durch die Beschaffenheit der Phänomene motiviert, nicht durch die Struktur der Theorie; es handelte sich um eine lokale Modellierung (Morrison 1999, 46–47, 53–61).

Lokale Modelle zählen daher auch in der epistemischen Forschung zu den unerlässlichen Hilfsmitteln. Sie vermitteln oft ein kausales Verständnis, wenn die übergreifenden Naturgesetze ein bloßes Rechenwerk bereitstellen und auf undurchschaubare Weise zutreffende Vorhersagen erzeugen (Morrison 1999, 46–47, 53–54; Hartmann 1999, 331–344). Zwar stellen lokale



Modelle ein wichtiges Merkmal angewandter Forschung dar, aber alles andere als ein exklusives Merkmal.

## 8. Die Strukturierung von Daten durch Theorien

Die Prominenz lokaler Modellierungen in der angewandten Forschung stützt das emergentistische Modell (s.o. Abs. 4), das die Wichtigkeit theorieunabhängiger, niederstufiger Bestimmungsstücke für die Erschließung der Phänomene und ihre praktische Nutzung unterstreicht. In der angewandten Forschung werden Modelle herangezogen, deren Struktur zwar von Theorien oder Naturgesetzen geprägt ist, die aber doch erheblichen Spielraum für die Anpassung an empirische Befunde lassen. Andererseits findet sich keine Vorherrschaft phänomenologischer Modelle, die von empirischen Anpassungen dominiert sind. Angewandte Forschung wird nicht von Zugangsweisen beherrscht, wie sie die Berechnung des Gezeitenwechsels bestimmen (s.o. Abs. 6). Tatsächlich ist die mangelnde Ausstrahlungskraft dieses Beispiels durchaus plausibel. In diesem ist nämlich erstens die Natur des fraglichen Phänomens unstrittig, und es gibt zweitens einen Algorithmus für dessen rein empirische Behandlung. Im Einzelnen stellt die Gravitationstheorie die Natur und Ursache des Gezeitenwechsels klar, während die Fourier-Analyse aussagekräftige Vorhersagen ohne Bezug auf diese Grundlagentheorie ermöglicht. Insbesondere die zweite Voraussetzung ist für typische Herausforderungen angewandter Forschung nicht erfüllt.

Das Beispiel des Riesenmagnetowiderstands führt dagegen die Beschaffenheit angewandter Forschungsprobleme deutlicher vor Augen. Die Ausprägung des Effekts hängt im Kern von zwei Bestimmungsgrößen ab, nämlich von den Eigenschaften der verwendeten Materialien und von den Abmessungen und Anordnungen der Schichten. Aber allein durch Veränderungen in diesen beiden Hinsichten ergibt sich eine unüberschaubare Vielzahl von möglichen Vorrichtungen. Es ist mühsam und teuer, alle diese Kombinationen durchzuprobieren, um ihre Tauglichkeit für den praktischen Einsatz zu ermitteln. Theoretische Abschätzungen verkleinern den Spielraum der Möglichkeiten und sind deshalb gerade aus praktischen Gründen von Bedeutung (Wilholt 2006, Abs. 4).

Noch wichtiger werden Theorien, wenn es darum geht, die relevanten Kenngrößen überhaupt erst zu identifizieren. Theorien, Hypothesen und Modelle erbringen eine wichtige Leistung bei der Strukturierung von Daten und lassen unter Umständen überhaupt erst erkennen, welche Art von Erfahrungsbefunden von Relevanz ist. Beim Riesenmagnetowiderstand ist

es der Rückbezug auf die qualitative theoretische Erklärung des Effekts, der die beiden Kenngrößen „Material“ und „Geometrie“ als wesentlich hervorhebt. Die übergreifenden Erklärungsansätze konstituieren den begrifflichen Raum der relevanten Faktoren und ermöglichen damit die Formulierung sinnvoller Untersuchungsfragen. Mit einer hinreichenden Zahl empirisch frei anpassbarer Parameter lässt sich jeder Prozess darstellen, aber jeder neue Prozess verlangt dann eine andere maßgeschneiderte Anpassung. Wegen der beliebigen Anpassbarkeit erhält man aussagekräftige Verallgemeinerungen auf diese Weise gerade nicht. Indem theoriengeprägte Modelle Kenngrößen eine Tragweite zuschreiben, die den jeweiligen Einzelfall überschreitet, leiten sie die empirische Prüfung an.

Eingangs war es zu den Prima-facie-Erwartungen der methodologischen Auswirkungen von Verwertungsdruck auf die Forschung gezählt worden, dass vermehrter Komplexitätsdruck tendenziell zu einer Abwendung von anspruchsvoller Theoriebildung führt und den Einsatz oberflächlicher, phänomenologisch geprägter Denkansätze favorisiert (s.o. Abs. 2). Die Untersuchung hat dagegen umgekehrt zutage gefördert, dass naturgesetzliche Beziehungen bei der begrifflichen und empirischen Erschließung komplexer Sachverhalte eine wichtige Rolle behalten. Gerade verwickelte Zusammenhänge sind durch eine ausschließlich phänomenologische Modellierung und durch eine Konzentration auf experimentelles Herumprobieren kaum zu entschlüsseln.

Beispiele für die Strukturierung der Daten durch theoretische Annahmen finden sich in der Grundlagenforschung nicht weniger als in der Anwendungsforschung. Die Wissenschaftsgeschichte stellt Beispiele dafür bereit, dass scheinbar offenkundige Muster in den Daten erst wahrgenommen wurden, nachdem man unter der Anleitung einer Hypothese das Augenmerk gezielt darauf richtete. Erst als John Daltons Atomtheorie von 1808 das Gesetz der multiplen Proportionen vorhersagte, wurden die betreffenden Regularitäten registriert. Dieses Gesetz bezieht sich auf mehrfache Verbindungen der gleichen Stoffe (wie CO und CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO und NO<sub>2</sub>) und postuliert, dass die Reaktionsgewichte des in unterschiedlichen Anteilen vertretenen Bestandteils bezogen auf ein festes Reaktionsgewicht des anderen Stoffs im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen. Bei CO und CO<sub>2</sub> bildet etwa das Gewicht des Sauerstoffs bezogen auf ein festes Kohlenstoffgewicht ein Verhältnis von eins zu zwei. Vor der Formulierung von Daltons Theorie war die Zusammensetzung von Verbindungen stets über die Gewichtsanteile der Elemente am Gesamtgewicht angegeben worden, und in diesen Werten finden sich keine ganzzahligen Verhältnisse. Erst die Theorie zeigte, dass das Verhältnis der Gewichte der Bestandteile zueinan-

der und nicht deren Anteil am Gesamtgewicht der entscheidende Parameter war.

Ein zweites Beispiel gleicher Art ist die sog. Brownsche Bewegung, eine 1830 von dem Botaniker Robert Brown entdeckte anhaltende Zitterbewegung von Pollenkörnern und ähnlich kleinen Objekten in Wasser. Dieses Phänomen zog sofort die Aufmerksamkeit auf sich; insbesondere war es für die kinetische Wärmetheorie von großem Interesse. Diese führte die Brownsche Bewegung auf Fluktuationen der thermischen Bewegung der Wassermoleküle zurück. Deren Zufallsschwankungen sollten sich zu einer wechselnden Gesamtkraft auf die Pollenkörner aufaddieren und entsprechend deren irreguläre Bewegungen erzeugen. Allerdings scheiterten die frühen Versuche der konkreten Umsetzung dieses im Kern zutreffenden Erklärungsansatzes. Es gelang nicht, aus der kinetischen Theorie empirisch prüfbare, geschweige denn empirisch bestätigte Relationen abzuleiten. Der Grund war, dass man stets die Geschwindigkeiten der Brownschen Teilchen ins Auge fasste, und für diese gibt es – wie sich später herausstellte – aufgrund von störenden Einflüssen keine einfach zu interpretierenden Regularitäten. Aus dem gleichen Grund brachten auch empirische Untersuchungen keine signifikanten Abhängigkeiten ans Licht.

Erst Albert Einstein 1905 und Maryan Smoluchowski gelang 1906 der Nachweis, dass aus der kinetischen Wärmetheorie tatsächlich neuartige Vorhersagen über die Eigenschaften der Brownschen Bewegung folgten. Darunter war insbesondere die empirisch gut nachprüfbare Prognose, dass die mittlere Weglänge, die ein Brownsches Teilchen zurücklegt, proportional zur Quadratwurzel aus der verfloßenen Zeit ist. Deren Bestätigung trug wesentlich zur Stützung der kinetischen Wärmetheorie und damit des Atomismus in der Physik bei.

Im gegenwärtigen Zusammenhang verdient besondere Beachtung, dass erst die theoriegeprägte Analyse die Identifikation von Kenngrößen gestattete, zwischen denen aussagekräftige Beziehungen bestehen. Die intensive empirische Untersuchung der Brownschen Bewegung hatte über Jahrzehnte hinweg vergleichsweise einfache Abhängigkeiten zwischen Beobachtungsgrößen verfehlt. Erst als die theoretische Analyse solche Zusammenhänge in den Blickpunkt rückte, wurden sie empirisch gefunden.

Der Schluss ist, dass gleichermaßen in angewandter Forschung und Grundlagenforschung empirische Untersuchungen dann besonders fruchtbar sind, wenn sie sich in einen theoretischen Rahmen einpassen und zu dessen Auffüllung beitragen. Hingegen gelingt es durch exklusiven Rekurs auf Beobachtungen häufig nicht, die relevanten Charakteristika aus der Vielfalt der Eigenschaften eines Phänomens auszuzeichnen. Nicht selten

ermöglicht erst die Strukturierungsleistung von Theorien die Figur-Grund-Unterscheidung bei den Beobachtungen, sodass diese Signifikanz und Tragweite erhalten.

Dieser Schluss scheint auf den ersten Blick geeignet, die Abhängigkeit der praktischen Nutzbarkeit von der theoretischen Erschließung und damit das Kaskadenmodell zu untermauern. Es hat den Anschein, als wäre die Korrektheit des theoretischen Rahmenwerks Vorbedingung der praktischen Verwendbarkeit der darauf gegründeten Modelle. Tatsächlich trägt jedoch das Argument diese weitergehende Konsequenz nicht. Gefordert ist nämlich lediglich eine Theorie, die die richtigen Größen als relevant hervorhebt. Das kann auch eine falsche Theorie sein – wie die Argumente zur Unterbestimmtheit von Theorien durch die Erfahrung und auch wissenschaftshistorische Befunde eindringlich nahe legen. Wie Pierre Duhem mit Nachdruck hervorhob und Willard Van Orman Quine unterstrich, sind Logik und Erfahrung für eine schlüssige Bestätigung und Widerlegung theoretischer Prinzipien nicht geeignet. Die Daten lassen stets Raum für alternative Erklärungen – auch wenn diese nach pragmatischen, nicht-empirischen Maßstäben möglicherweise unterlegen sind (Duhem 1906, 243–249, 291–292; Quine & Ullian 1978, 79, 97). Weitergehend hat Imre Lakatos betont, dass fehlgehende Theorieansätze auch fruchtbare, den wissenschaftlichen Fortschritt befördernde Entwicklungen zu stützen vermögen (Lakatos 1970, 131–134, 146, 180–182).

Ein charakteristisches wissenschaftshistorisches Beispiel ist Sadi Carnots thermodynamische Analyse der Dampfmaschine auf der Basis der seinerzeit verbreiteten Wärmestofftheorie. In seinen 1824 erschienenen „Betrachtungen zur bewegenden Kraft des Feuers“ fasste Carnot die Wirkungsweise einer Wärmekraftmaschine nach dem Vorbild eines Wasserrads auf. Die Wärmestofftheorie besagt, dass Wärme eine gewichtslose, unzerstörbare Substanz ist, sodass sie (wie andere Substanzen) einem Erhaltungssatz unterliegt. Der Wärmestoffanteil in einem Körper bestimmt dessen Temperatur, und der Wärmestoffübergang zwischen Körpern drückt sich als Erwärmung oder Abkühlung aus. Carnots Analyse orientierte sich am Wasserrad und sah Arbeit durch den „Fall“ von Wärmestoff von der hohen Temperatur des Kessels auf die niedrige Temperatur des Kondensators erzeugt. Im Gegensatz zur Auffassung von Wärmekraftmaschinen im Rahmen der späteren klassischen („phänomenologischen“) Thermodynamik wird also keineswegs Wärme in Arbeit umgewandelt; Arbeit entsteht stattdessen aus dem Übergang von Wärmestoff vom warmen zum kalten Körper. Die geleistete Arbeit ergibt sich dabei aus der Wärmemenge als dem Quantum des beteiligten Wärmestoffs (analog der Masse fallenden

Wassers) und der Temperaturdifferenz (analog der Fallhöhe). Daraus zog Carnot den Schluss, dass eine Wärmekraftmaschine Arbeit nur aus Temperaturunterschieden zu erzeugen vermag. Ihm gelang die Angabe eines Ausdrucks für den maximalen Wirkungsgrad einer Dampfmaschine, der allein diese Temperaturunterschiede einbezog und entsprechend zur Folge hatte, dass die Effizienz von Wärmekraftmaschinen von der Wahl des Betriebsmittels unabhängig ist und – im Gegensatz zur damals vorherrschenden Auffassung – nicht durch den Einsatz von Luft statt Wasserdampf als Betriebsmittel gesteigert werden kann. Carnot erzielte damit auf dem Boden der irrigen Wärmerstofftheorie den Durchbruch zu begrifflichen Innovationen (wie „Wirkungsgrad“, aber auch „Kreisprozess“ und „Reversibilität“), die auch für die nachfolgende klassische Thermodynamik prägend blieben und die insbesondere die richtigen empirischen Kenngrößen und ihre Zusammenhänge identifizierten.

Diese Überlegungen verdeutlichen, dass die erfolgreiche Strukturierung des Erfahrungsraums keinen überzeugenden Grund für die Richtigkeit des dafür herangezogenen theoretischen Rahmens liefert. Zwar benötigt man eine Theorie, die die richtigen Beobachtungsgrößen herausgreift, aber diese Leistung kann auch eine unzutreffende Theorie erbringen. Das Beispiel Carnots führt klar vor Augen, dass die Identifikation der relevanten Parameter und sogar der Aufweis der korrekten Abhängigkeiten zwischen ihnen auch auf falscher theoretischer Grundlage gelingen können.

Dies ist kein Einzelfall. Bei der Formulierung der sog. Maxwell'schen Gleichungen, die bis zum heutigen Tag eine wesentliche Errungenschaft der Elektrodynamik bilden, ging James C. Maxwell von Modellen aus, die sich bereits kurze Zeit später als wenig tragfähig erwiesen. Wesentliche Schritte auf dem Weg zu diesen Gleichungen stützten sich auf mechanische Modelle von Ätherzuständen, die als Überträger elektromagnetischer Wirkungen fungieren sollten. Solche Wirkungen sollten sich über die Fortpflanzung von Druckdifferenzen im Äther ausbreiten, die ihrerseits als durch Molekularwirbel erzeugt gedacht wurden (Maxwell 1861/62, 5–9, 23–24). Nichts davon hat den Test der Zeit bestanden. Im Einklang mit Lakatos ist also einzuräumen, dass auch sachlich fehlgehende Ansätze zu wichtigen konzeptionellen Innovationen beitragen können und wissenschaftshistorisch wiederholt die Identifikation belastbarer empirischer Zusammenhänge ermöglicht haben.

## 9. Theoretische Durchdringung und Nachhaltigkeit des praktischen Eingriffs

Die vorangehenden Überlegungen betonen die Wichtigkeit des epistemischen Zugriffs für die praktische Nutzung in den initialen Phasen der Erforschung eines Phänomens. Wer gar nichts versteht, wird aus Erfahrung nur wenig lernen. Allerdings muss das Verständnis nicht auch in einem realistischen Sinn korrekt sein; empirische Adäquatheit der Konsequenzen reicht hin. Systematische Argumente und wissenschaftshistorische Beobachtungen verdeutlichen, dass die Korrektheit dieses theoretischen Rahmenwerks keineswegs Vorbedingung für die Richtigkeit der Beobachtungskonsequenzen und ebenso wenig Voraussetzung für die praktische Verwendbarkeit der darauf gegründeten Modelle ist. Die Isolation grundlegender Beziehungen eines Sachbereichs kann unter Umständen auch von epistemisch unzulänglichen Theorieansätzen erreicht werden. Ebenso können bei der Umsetzung und Präzisierung dieses Rahmenwerks durchaus Grundsätze und Mechanismen Eingang finden, die nicht auf diejenigen Prozesse Bezug nehmen, die den betreffenden Phänomenen der Sache nach zugrunde liegen. Instrumentalistisch gedeutete Ansätze können praktische Relevanz erlangen – wie die Beispiele der Atmosphärendynamik und der Modellierung von Schockwellen deutlich machen. Auch hier ist der Zusammenhang von Nutzbarkeit und Richtigkeit nicht sehr markant ausgeprägt (s.o. Abs. 7).

Stattdessen ist es die finale Phase der Geltungssicherung von empirischen Zusammenhängen, bei der die Richtigkeit theoretischer Grundsätze eine besondere Bedeutung erlangt. Erst ein zutreffendes theoretisches Verständnis der Einzelheiten kann im Allgemeinen die dauerhafte Beherrschung von Effekten und entsprechend die Zuverlässigkeit darauf gegründeter Vorrichtungen sicherstellen. Die Kontrolle von Komplikationen und Störfaktoren mit einer für die Verlässlichkeit der Nutzung hinreichenden Präzision ist ohne zutreffende theoretische Durchdringung der einschlägigen Sachzusammenhänge nur selten möglich. Es ist die Aufrechterhaltung der Wirksamkeit eines Verfahrens oder dessen Verbesserung, bei der angewandte Forschung durch die Anbindung an übergreifende Grundlagentheorien und realistische theoretische Rahmenwerke am meisten profitiert. Wenn es um die Nachhaltigkeit des praktischen Eingriffs geht, entfalten Theorien ihre größten Stärken.

Die Geschichte der Antibiotika führt die einschlägigen Zusammenhänge vor Augen. Alexander Fleming entdeckte 1928 die antibiotische Wirkung von Penicillin durch Zufall. Er registrierte, dass Staphylokokkenkulturen,

die unbeabsichtigt mit dem Schimmelpilz *Penicillium notatum* verunreinigt waren, abstarben. Fleming fiel also auf, dass es sich bei einer solchen Wachstumshemmung von Bakterienkulturen um ein unerwartetes, der weiteren Untersuchung würdiges Phänomen handelte. Diese Auszeichnung eines Sachzusammenhangs als relevant stellte den Schlüssel für Flemings Entdeckung dar; ein Verständnis der zugehörigen biologischen Vorgänge war nicht erforderlich. Die antibiotische Wirksamkeit von Penicillin ist eine kontextualisierte Kausalbeziehung und eröffnet als solche erste Eingriffsoptionen (s.o. Abs. 5, 7). Aber der nachfolgenden Komplikation der Resistenzbildung konnte man nicht mehr ohne profundes biologisches Wissen Herr werden. Bei Auftreten von Störungen oder Komplikationen sind die Geltungsgrenzen solcher kontextualisierter Kausalbeziehungen überschritten. Die Resistenzbildung geht auf die Selektion von Bakterienvarianten zurück, bei denen die molekulare Struktur der Zellwand weniger anfällig für den Einfluss des Medikaments ist. Erst die Entschlüsselung des Wirkmechanismus eines Antibiotikums und des Prozesses der Resistenzbildung erlaubt die Entwicklung von Gegenmaßnahmen. Man modifiziert nämlich die Wirkstoffmoleküle auf solche Weise, dass die betreffenden Schutzmechanismen in der Zelle blockiert werden. Eine solche Wiederherstellung der Wirksamkeit eines Verfahrens bei Auftreten von Störfaktoren erfordert die theoretische Durchdringung der zugehörigen Kausalmechanismen (Carrier 2004a, 176–177).

Zwar greift unter Umständen bereits die Entwicklung neuer Medikamente auf fortgeschrittenes Wissen über die zugrunde liegenden Zellprozesse zurück. Aber in erster Linie ist es die Steigerung der Wirksamkeit von neuen Arzneimitteln oder die Sicherung ihrer Wirksamkeit bei Auftreten von Komplikationen, welche Einsichten in die molekularen Grundlagen des betreffenden Krankheitsgeschehens verlangen. In solchen Fragen ist medizinischer Fortschritt nicht selten eine Folge der Aufklärung der molekularen Mechanismen, deren Fehlfunktion der Krankheit zugrunde liegt. Auf avanziertem technologischen Niveau sind Wissen und Können nicht voneinander zu trennen. Hier zeigt sich der Zusammenhang von Nutzbarkeit und Richtigkeit endlich mit Nachdruck.

Die ersten Schritte bei der Entwicklung einer Technologie können folglich auch ohne fortgeschrittene theoretische Hilfsmittel getan werden. Vergleichsweise grobe Vorstellungen des betreffenden Sachbereichs oder gar irrtümliche Auffassungen reichen nicht selten für die Identifikation der relevanten Größen hin, deren Zusammenhang zur Not auch durch Versuch und Irrtum ermittelt werden kann. Aber die nachfolgende Verbesserung der Technologie ist häufig auf theoretische Analyse angewiesen. Für die Be-

herrschaft von Komplikationen ist in der Regel ein vertieftes Verständnis unerlässlich. Ich hatte genau diese Schlussfolgerung am Beispiel des Umbruchs der Biotechnologie zur Proteomik gezogen (s.o. Abs. 5). Kontextualisierte Zusammenhänge zwischen Gen und Zelleigenschaft stießen bald an ihre Geltungsgrenzen; eine anhaltend erfolgreiche Technologieentwicklung setzte einen theoretisch weiter fortgeschrittenen Rahmen voraus. Nur in einer geringen Zahl von Fällen lassen sich Krankheiten mit spezifischen Gendefekten in Beziehung setzen; in einer weit größeren Zahl von Fällen ergibt sich ein aussagekräftiges Bild erst aus der Analyse des verwickelten Zusammenspiels von Genprodukten, also den Proteinen. Bei einer Vernachlässigung solcher Wechselwirkungen bleibt auch die praktische Nutzbarkeit beschränkt.

Es sind die fortgeschrittenen Erklärungsleistungen komplexer Zusammenhänge, wie sie in finalen Phasen angewandter Forschung erforderlich werden, die am ehesten einen korrekten Theorieansatz verlangen und damit die angewandte Forschung mit epistemischer Tragweite ausstatten. Die Zuverlässigkeit der Intervention kann häufig nur durch eine epistemische Durchdringung der betreffenden Prozesse nachhaltig gesichert werden. Wenn es auf die Einzelheiten ankommt, dann ist ein zutreffender Theorienrahmen oftmals Voraussetzung des praktischen Erfolgs. Die vorangehenden Stufen des angewandten Forschungsprozesses sind dagegen durch weit größere Fehlertoleranz charakterisiert.

Ich hatte zuvor auf die Spannung hingewiesen, die zwischen dem Kaskadenmodell und der Behauptung der Herrschaft universeller Gesetze einerseits und dem emergentistischen, vom Leitbild des Flickenteppichs bestimmten Ansatz mit dem Primat spezifischer Behandlungsweisen und lokaler Lösungsansätze andererseits besteht (s.o. Abs. 3–4). In dieser Frage stehen Francis Bacon und Vannevar Bush auf der einen Seite und Nancy Cartwright sowie die Verfechter des „Modus 2“ und der „postnormalen Wissenschaft“ auf der anderen. Tatsächlich ist aber in der Wissenschaftsphilosophie eine weitere Position verbreitet, die als Vermittlung zwischen diesen beiden Extremen aufgefasst werden kann. Dabei handelt es sich um die These von der partiellen Autonomie von Modellen, die wesentlich auf Margaret Morrison zurückgeht. Im Einklang mit Cartwright wird festgestellt, dass es lokale, an den spezifischen Erfahrungsbefunden orientierte Modelle sind, und nicht abstrakte Theorien, die das Verhalten physikalischer Systeme zu erklären vermögen; es wird jedoch gegen Cartwright geltend gemacht, dass höherstufige Theorien in weiten Sachbereichen eine zentrale Rolle bei der Strukturierung dieser Modelle spielen und Optionen zur Erklärung der Phänomene eröffnen. In dieser Sicht bilden theore-



tische Prinzipien einen unverzichtbaren Teil der betreffenden Modelle und tragen aus diesem Grund auch einen wichtigen Anteil der Erklärungslast. Andererseits beziehen Modelle auch Verallgemeinerungen ohne theoretische Grundlage ein (neben Angaben über die Situationsumstände). Damit hängen Modelle wesentlich von Theorien ab – aber nur zum Teil. Die Anwendung einer Theorie auf die Erfahrung kann nicht allein durch Ableitung empirischer Konsequenzen aus theoretischen Prinzipien erfolgen, sondern verlangt einen eigenständigen Prozess der Modellbildung (Morrison 1998, 70; Morrison 1999, 39, 61–63; vgl. Winsberg 2003, 106).

Partiell autonome Modelle ergeben sich etwa durch Anwendung semi-empirischer Methoden, die bei verwickelten Grundlagenproblemen zum Tragen gebracht werden. Zwar sollte ein Fundamentalgesetz wie die Schrödinger-Gleichung eigentlich geeignet sein, Probleme wie die Berechnung der Bindungsenergie des Wasserstoffmoleküls unter einer Reihe von äußeren Zwangsbedingungen zu lösen. Tatsächlich scheitert eine solche *ab-initio*-Lösung jedoch an der Komplexität der Umstände. Resultate werden gleichwohl dadurch erzielt, dass bestimmte Kenngrößen, die auf theoretischer Grundlage ableitbar sein sollten, aus den Daten abgelesen und in der theoretischen Behandlung vorgegeben werden. Solche semi-empirischen Verfahren gehen nicht insgesamt von den Daten aus; es werden keine phänomenologischen Modelle formuliert. Aber es wird auch keine Deduktion aus ersten Prinzipien erreicht. Zwar strukturieren die Naturgesetze die Beschaffenheit der Modelle, lassen aber einen Spielraum für freie Parameter, die nur durch Bezug auf die Daten ermittelt werden können (Ramsey 1997, 631–638).

Dieses Bild partiell autonomer Modellbildungen ist für die epistemisch orientierte Wissenschaft entwickelt worden, es beleuchtet jedoch ebenso den Zusammenhang zwischen Theorie und Erfahrung in applikativen Untersuchungen (Carrier 2004c, 9–15). Insbesondere handelt es sich bei den partiell autonomen Modellen um lokale Modelle im zuvor angegebenen Sinn (s.o. Abs. 7). Dadurch ergibt sich eine Position, die der Kaskade und dem Flickenteppich jeweils eine begrenzte Tragweite zugesteht: Einerseits ist das Fundamentale von Relevanz für die Erklärung des Besonderen, andererseits ist auch die theoretisch unvermittelte Berücksichtigung des Konkreten unerlässlich. Bezogen auf die angewandte Forschung besagt dieses abgeschwächte Kaskadenmodell oder dieser gemäßigte Emergentismus, dass die Entwicklung fortgeschrittener Technologien auf theoriegeprägte Modelle und unter Umständen auch auf zutreffende theoretische Rahmenwerke angewiesen bleibt, dass aber die Umsetzung dieser Rahmenwerke durch die Spezifika der Problemlage bestimmt ist und ins-

besondere Parameteranpassungen oder instrumentalistische Zusätze einschließen kann. Die Modelle der atmosphärischen Zirkulation greifen auf die physikalischen Grundgleichungen zurück, lösen sie aber durch unrealistische Ansätze, und die Modelle des Riesenmagnetowiderstands sind durch die Gesetzmäßigkeiten der Grundlagentheorie bestimmt, bedürfen aber der Auffüllung durch jeweils spezifische Sachinformationen. Die Modelle sind also in ihrer Struktur theoretisch geprägt und in ihren Einzelheiten durch die Daten bestimmt.

## 10. Anwendungsinnovativität

Die vorangehenden Erörterungen waren darauf gerichtet, die Tragweite bereits verfügbaren Grundlagenwissens für die Gewinnung applikativen Neulands abzuschätzen. Tatsächlich ist jedoch auch der umgekehrte Zusammenhang von großer Bedeutung. Nicht selten beeinflussen technische Innovationen auch das wissenschaftliche Verständnis; zwischen wissenschaftlichem und technischem Fortschritt besteht ein wechselseitiger oder interaktiver Zusammenhang (Stokes 1997, 87; vgl. Gibbons et al. 1994, 19). Insbesondere wird unter Umständen das für technologische Neuerungen erforderliche Grundlagenwissen erst im Anwendungskontext produziert. Herausforderungen der angewandten Forschung können Grundlagenfragen aufwerfen und sind dann ohne deren Behandlung nicht angemessen zu bewältigen. Daher ist Grundlagenforschung auch eine – in der Regel unbeabsichtigte – Folge erfolgreicher angewandter Forschung. Innovative Erklärungsansätze mit Grundlagenrelevanz werden auch von der angewandten Forschung hervorgebracht (Rosenberg 1990, 169; Stokes 1997, 87–88).

Dieses Phänomen der *Anwendungsinnovation* beinhaltet, dass im Zuge der Formulierung nutzungsrelevanter Ansätze als ungeplante Nebenwirkung theoretisch signifikante Neuerungen entwickelt werden. Bei anwendungsinnovativer Forschung führt die Steigerung des Interventionsvermögens zu vertieften Einsichten in den Naturzusammenhang.

Ein Beispiel aus der biomedizinischen Forschung bildet die Konzeption der Retroviren, die im praktischen Kontext der Aufklärung von Infektionsketten entwickelt wurde und insbesondere bei den Versuchen zur Beherrschung von AIDS eine wichtige Rolle spielt, die aber zugleich tief greifende Auswirkungen auf das biologische Verständnis hatte. Die Aktivität von Retroviren beinhaltet ein Umschreiben von RNA in DNA; diese Konzeption trug entsprechend dazu bei, das sog. „zentrale Dogma der Molekularbiologie“ einzuschränken, das ursprünglich einen einseitigen Informationsfluss von der DNA über die RNA zum Protein vorgesehen hatte. Ebenso um-

fasste die Entwicklung von Diode und Transistor in den 1960er Jahren die Ausarbeitung der für die Festkörperphysik hochbedeutsamen theoretischen Konzeption der Dotierung.

Hintergrund der Anwendungsinnovativität ist letztlich ein Zusammenhang zwischen Grundlagen und Anwendungen, wie er dem Kaskadenmodell zugrunde liegt. Die angewandte Forschung drängt zu den Grundlagen, weil deren vertieftes Verständnis die technologischen Chancen verbessert. So eröffnet die Entschlüsselung von Kausalmechanismen in der Regel einen weit größeren Spielraum für Eingriffe als kontextualisierte, also stark voraussetzungsgebundene Kausalbeziehungen. Ebenso erschließt eine theoretisch vereinheitlichte Behandlung eines Prozesses Querverbindungen zu weiteren Prozessen und eröffnet dadurch zusätzliche Interventionsoptionen. Die Formulierung einer übergreifenden Theorie verbessert die Aussichten, diejenigen Stellen einer Ursachenkette zu identifizieren, an denen ein zielführender, gegen Störeinflüsse abgesicherter und nebenwirkungsarmer technischer Eingriff ansetzen kann. Wenn man angewandte Fragen optimal behandeln will, darf man sie nicht allein als angewandte Fragen behandeln – und deshalb wird die praktisch wichtige Voraussetzung der theoretischen Durchdringung erforderlichenfalls in anwendungsorientierten Untersuchungen geschaffen.

Aber neben die Behauptung der sachlichen Abhängigkeit der Anwendungen von den theoretischen Grundlagen tritt im Kaskadenmodell auch die These, dass der Forschungsheuristik nach der Primat bei der Grundlagenforschung liegt. Die Lösung praktischer Probleme ist sowohl der Sache nach als auch der konkreten Vorgehensweise nach auf Grundlagenforschung angewiesen. Wird ein Forschungsprojekt zu früh auf konkrete Nutzungen ausgerichtet, ist mit dessen Scheitern zu rechnen. Die Empfehlung des Bush-Reports zur Steigerung der praktischen Nützlichkeit der Wissenschaften lautete entsprechend, breit angelegte Grundlagenforschung zu fördern (s.o. Abs. 3). In dieser Hinsicht ergibt sich jedoch aus den hier vorgestellten Untersuchungen ein anderes Bild. Anwendungsinnovativität macht deutlich, dass grundlagenrelevante Ergebnisse auch eine *Folge* angewandter Forschung sein können. Grundlagenforschung kann auch aus dem Anwendungskontext erwachsen.

Das in anderem Zusammenhang erörterte Beispiel der Fortentwicklung der Dampfmaschine ist eines der frühesten Fälle von Anwendungsinnovativität. Die Erfindung der Dampfmaschine verdankt sich der erwähnten Tüftler-und-Bastler-Mentalität. Ihr Entwurf und ihre Konstruktion stützten sich nicht auf ein theoretisches Verständnis der zugehörigen Naturprozesse. Es ist wiederholt festgestellt worden, dass die Wissenschaft der Dampfma-

schine weit mehr verdankt als umgekehrt die Dampfmaschine der Wissenschaft. Ebenfalls im Einklang mit dem zuvor gezeichneten Bild (s.o. Abs. 8) war es die Verbesserung und Effizienzsteigerung der Dampfmaschine, die eine vertiefte theoretische Durchdringung dieser Prozesse veranlasste. Dabei kommt es jetzt darauf an, dass diese Durchdringung auch in wissenschaftlicher Hinsicht fruchtbar war und epistemische Erträge abwarf. Im Zuge seiner Analyse der Wirkungsweise der Dampfmaschine führte Carnot (wie erwähnt) Konzepte der Thermodynamik ein, die trotz der unzulänglichen theoretischen Grundlage bis zum heutigen Tag ihre Signifikanz behalten haben. Aus dieser theoretischen Analyse ergaben sich dann wieder die vorgenannten praktischen Konsequenzen für die Verbesserung des Wirkungsgrads (s.o. Abs. 8).

Auf ein ähnliches Muster trifft man in Teilen der neueren pharmazeutischen Forschung. Ein Beispiel ist die Entwicklung der ersten Betablocker Anfang der 1960er Jahre, die eine Senkung des Sauerstoffbedarfs des Herzens durch Verminderung des Pulsschlags ohne gleichzeitige Beeinflussung des Blutdrucks erreichten. Diese Entwicklung ging klar von praktischen Herausforderungen aus, brachte aber zugleich grundlegende Erkenntnisse über das körpereigene System der Adrenalinrezeptoren hervor. Die Entwicklung der Betablocker stützte sich auf theoretische Hypothesen, die zum betreffenden Zeitpunkt neuartig waren und keineswegs allgemein geteilt wurden. Diese Hypothesen besagten unter anderem, dass Menschen über zwei unabhängig ansprechbare Typen sog. adrenerger Rezeptoren verfügen, Alpha- und Betarezeptoren, und dass die physiologische Wirkung durch zwei unabhängig variierbare Einflussfaktoren, nämlich das Ausmaß und die Intensität der Bindung des Wirkstoffs an den Rezeptor bestimmt ist. Diese innovativen Ansätze waren von zentraler Bedeutung für den letztendlichen praktischen Erfolg der Entwicklung neuer Therapieoptionen, vertieften aber zugleich das Verständnis des adrenergen Systems im menschlichen Körper. Tatsächlich wurden die betreffenden physiologischen Hypothesen erst aufgrund der Therapieerfolge in der wissenschaftlichen Gemeinschaft angenommen. Bei diesem Erkenntnisfortschritt erwachsen also sowohl die Fragestellung als auch die empirische Stützung aus dem Anwendungszusammenhang; Hypothesenbildung und Hypothesenbestätigung stehen im Anwendungskontext, besitzen aber epistemische Tragweite (Adam 2004, 64–67; Adam 2005, 512–522, 533–534).

Die Untersuchung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in der Industrie hat verdeutlicht, dass die Chancen für Anwendungsinnovativität dann besonders gut stehen, wenn das anstehende Problem die Reichweite des verfügbaren Wissens um ein gleichsam mittleres Maß überschreitet.

Wenn die gesicherten Kenntnisse bereits hinreichend Aufschluss über die relevanten Einzelheiten geben, dann wird das Kaskadenmodell zum Tragen gebracht und die applikative Neuerung aus dem Stand des Wissens heraus entwickelt. Lässt hingegen das System des Wissens keinerlei Verbindung zur praktischen Herausforderung erkennen, so werden keine fruchtbaren Forschungswege aufgezeigt und entsprechend eher theoretisch uninformierte Strategien wie schematische Durchmusterung oder Versuch und Irrtum herangezogen. Selbst wenn solche Strategien zu praktischen Erfolgen führen, bahnen sie keine neuen Wege wissenschaftlichen Verstehens. Anwendungsinnovativität ist stattdessen am ehesten zu erwarten, wenn einerseits bereits einschlägige theoretische Zusammenhänge bekannt sind, diese aber andererseits einen beträchtlichen Teil der praktisch relevanten Sachzusammenhänge offen lassen (Adam 2004, 73–74; Adam 2005, 531–534).

Angewandte Forschung bringt also unter Umständen selbst diejenigen grundlagenrelevanten Erkenntnisse hervor, die für fruchtbare und neuartige Anwendungen benötigt werden. Obgleich angewandte Forschung ihrer Zielsetzung nach ohne epistemische Ambitionen ist, leistet sie unter Umständen auch Erkenntnisbeiträge.

## 11. Schlussfolgerung

Ergebnis ist damit erstens, dass der Zusammenhang zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung uneinheitlich ist und dreierlei Ausprägung besitzt. Sowohl das Kaskadenmodell mit seiner Betonung universeller Naturgesetze, als auch der vom Leitbild des Flickenteppichs beherrschte emergentistische Ansatz mit seiner Akzentuierung spezifischer Hypothesen, als auch die interaktive Sicht, die den Einfluss der Grundlagenforschung auf die Technologieentwicklung ebenso anerkennt wie umgekehrt die epistemische Prägungswirkung praktischer Fragen, lassen sich in der Praxis angewandter Forschung auffinden. Angewandte Forschung tritt sowohl als Wirkung von Grundlagenforschung auf, als auch als deren Ursache sowie auch ohne engen Zusammenhang mit dieser.

Das Kaskadenmodell behält seine Gültigkeit in der initialen, vor allem aber in der finalen Phase angewandter Untersuchungen. In der initialen Phase tragen Theorien zur begrifflichen und inhaltlichen Strukturierung des Sachbereichs bei und befördern daher die Aufdeckung signifikanter Zusammenhänge zwischen praktisch relevanten Kenngrößen. In der finalen Phase sind es theoretische Grundsätze, die die Geltungssicherung von Zusammenhängen gewährleisten und entsprechend die Zuverlässigkeit von

Vorrichtungen zu garantieren vermögen. Lösungsansätze der angewandten Forschung gewinnen ihre epistemische Tragweite und zum Teil auch ihre Verlässlichkeit aus dieser Anbindung an übergreifende Theorien. Die Lösung praktischer Probleme bleibt also vielfach auf Grundlagenforschung angewiesen.

Der emergentistische Ansatz schöpft seine Tragweite daraus, dass der jeweils zugehörige theoretische Rahmen Raum für Anpassungen durch die Daten lässt. Die Reichweite des epistemischen Zugriffs ist oftmals geringer als vom Kaskadenmodell nahe gelegt. Die gerade aus praktischem Blickwinkel wesentlichen Einzelheiten und Details werden nicht selten durch Beobachtung und Messung, durch Versuch und Irrtum gewonnen. Die Lösungsansätze der angewandten Forschung besitzen damit eine partielle Autonomie; sie sind durch Theorien geprägt, aber nicht zur Gänze festgelegt. Die Lösung praktischer Probleme nimmt dann keinen Bezug auf Ansätze der Grundlagenforschung.

Das interaktive Modell macht deutlich, dass Naturerkenntnis unter Umständen aus der Meisterung technischer Herausforderungen hervorgeht. Grundsätzlich können sich praktisch relevante Neuerungen aus angewandter Forschung ergeben, bedürfen also nicht stets des Wegs über Grundlagenenerkenntnisse. Andererseits erbringt angewandte Forschung aber auch Einsichten in grundlagenrelevante Zusammenhänge. Das Kaskadenmodell kann als die Behauptung einer sowohl sachlichen als auch kausalen Abhängigkeit technologischer Innovation von Grundlagenenerkenntnis aufgefasst werden. Die Wirkungsweise einer Vorrichtung kann durch die einschlägige Theorie erklärt werden, und die Vorrichtung wurde unter Rückgriff auf diese Theorie entwickelt. Die sachlichen oder logischen und die kausalen oder zeitlichen Beziehungen weisen gleichsam in dieselbe Richtung: zunächst formuliert man theoretische Prinzipien, und anschließend entwirft man technische Vorrichtungen, indem man die Folgen dieser Prinzipien ausbuchstabiert.

Bei Vorliegen von Anwendungsinnovativität weisen demgegenüber die sachlichen und kausalen Beziehungen zwischen Wissenschaft und Technik gleichsam in entgegengesetzte Richtungen. In kausaler Hinsicht können Einsichten von Grundlagenrelevanz aus praktischen Forschungsvorhaben erwachsen, auch wenn die praktischen Erfolge sachlich auf der epistemischen Erschließung des Phänomenbereichs beruhen. Daraus ergeben sich Konsequenzen für die Forschungsheuristik im angewandten Bereich. Anders als es der Bush-Report empfahl, ist dann nämlich keineswegs stets die Förderung der Grundlagenforschung das wirksamste Mittel zur Gewinnung nutzbringender Resultate. Vielmehr kann die angemessene Forschungsheu-

ristik zur Lösung praktischer Probleme gerade darin bestehen, diese praktischen Probleme direkt zu untersuchen und hinreichend viel Spielraum für die Entwicklung grundlagenrelevanter Hypothesen zu lassen.

Anwendungsinnovativität führt daher in markanter Form vor Augen, dass sich erkenntnisorientierte und nutzenorientierte Forschung zwar hinsichtlich ihrer Zielvorgaben kategorisch unterscheiden (s.o. Abs. 2), dass aber ein gegebenes Forschungsvorhaben ohne Widerspruch beide Ziele verfolgen kann. Zwar besteht zwischen Grundlagenforschung, die auf Naturverstehen gerichtet ist, und anwendungsorientierter Forschung, die auf konkrete praktische Erfolge setzt, eine begriffliche Dichotomie. Diese Dichotomie begründet aber keine empirische Scheidung von Forschungsvorhaben in zwei getrennte Teilgruppen. Unter Umständen kann man auch zwei Herren dienen.

Zweitens finden sich in der angewandten Forschung zwar Anzeichen für provisorische Erkenntnisstrategien, aber diese bleiben in ihrer Tragweite begrenzt. Auch praktische Ziele werden nicht selten mit den Mitteln der theoretischen Durchdringung und der Entschlüsselung von Kausalketten verfolgt. Entsprechend wird angewandte Forschung eben keineswegs von bloß kontextualisierten Kausalbeziehungen dominiert. Die vorgeblich pragmatisch verengte Haltung der praktischen Wissenschaften läuft Gefahr, sich selbst aufzuheben und in praktischer Hinsicht zu scheitern (s.o. Abs. 5). Umgekehrt finden sich lokale Modellierungen nicht allein in angewandter Forschung, sondern auch in der Grundlagenforschung. Zudem handelt es sich bei diesen keineswegs um eine provisorische Erkenntnisstrategie; vielmehr erzeugen sie nicht selten erst ein kausales Verständnis der betreffenden Phänomene (s.o. Abs. 7).

Allerdings ist der für eine solche Erkenntnisorientierung angewandter Forschung förderliche Zusammenhang von Nutzbarkeit und Richtigkeit komplex und uneinheitlich. In der explorativen Phase ist zwar häufig eine Theorie vonnöten, es muss sich aber nicht um die richtige Theorie handeln. Die Leistung dieser Theorie besteht in der Identifikation der relevanten Beobachtungsgrößen eines Phänomens, und eine solche Leistung kann auch von falschen Theorien erbracht werden – und ist wiederholt von falschen Theorien erbracht worden. Hingegen sind die Anforderungen an die zutreffende theoretische Durchdringung von Phänomenen bei der Verlässlichkeitssicherung von technischen Verfahren höher. Wenn es darum geht, die Zuverlässigkeit des technologischen Eingriffs unter vielfältigen und wechselnden Anwendungsbedingungen zu erhalten, dann müssen in aller Regel die wirksamen Kausalfaktoren identifiziert und in ihrer Wirkung erfasst

sein – auch wenn dabei empirische Parameteranpassungen und instrumentalistische Modelle unter Umständen ihren Platz behalten.

Beide Schlussfolgerungen stützen die Behauptung, dass epistemisch akzentuierte Forschung auch im Anwendungskontext einen bedeutenden Stellenwert behält. Der Anwendungsdruck auf die Wissenschaft ist danach von geringeren Auswirkungen auf den Erkenntnisanspruch der Wissenschaft begleitet, als es die Betrachtung der institutionellen Verschiebungen in der Wissenschaft nahe legen könnte (s.o. Abs. 1). Diese markanten institutionellen Verschiebungen sind nicht von ebenso tief greifenden epistemischen Veränderungen begleitet. Zwar ist Anwendungserfolg nicht ausnahmslos, wohl aber in mehrerlei Hinsicht von wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung abhängig, und angewandte Forschung trägt unter Umständen zum wissenschaftlichen Verstehen bei. Insgesamt schließt sich damit angewandte Forschung in nicht geringem Ausmaß an epistemische Wissenschaft an. In der Folge sind die Auswirkungen des Anwendungsdrucks auf die Beschaffenheit wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung und auf den Erkenntnisanspruch der Wissenschaft weniger stark ausgeprägt als von den Vertretern der These vom Epochenbruch behauptet (s.o. Abs. 1). Mit diesem Ergebnis verbunden ist eine, wenn auch begrenzte methodologische Rehabilitierung angewandter Forschung. Das Verstehen von Naturzusammenhängen und der gezielte Eingriff in diese sind oftmals wechselseitig aufeinander angewiesen.

## Literatur

- Adam, Matthias (2004), „Wechselwirkungen von Forschung und Entwicklung: Mechanismen, Modelle und Wirkstoffe in anwendungsdominierter Pharmaforschung“, in: R. Bluhm & C. Nimtz (Hrsg.), *Ausgewählte Sektionsbeiträge des 5. Internationalen Kongresses der Gesellschaft für Analytische Philosophie*, Paderborn: Mentis, 62–76.
- Adam, Matthias (2005), „Integrating Research and Development: The Emergence of Rational Drug Design in the Pharmaceutical Industry“, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 36, 513–537.
- Bacon, Francis (1620), *Neues Organon I*, hrsg. v. W. Krohn, lat./dt., Hamburg: Meiner, 1990.
- Bains, William (1997), „Should We Hire an Epistemologist?“, in: *Nature Biotechnology* 15, 396.
- Brown, James R. (2005), „The Community of Science<sup>®</sup>“, in: M. Carrier et al. (Hrsg.), *Science and Values: The Challenge of the Social and the Pressure of Practice*, im Druck.
- Bush, Vannevar (1945), *Science The Endless Frontier. A Report to the President*, Washington D. C.: United States Government Printing Office, <http://www.nsf.gov/od/lpa/nsf50/vbush1945.htm>
- Carrier, Martin (2004a), „Interessen als Erkenntnisgrenzen? Die Wissenschaft unter Verwertungsdruck“, in: W. Hogrebe & J. Bromand (Hrsg.), *Grenzen und Grenzüberschreitungen*.



- XIX. *Deutscher Kongress für Philosophie. Vorträge und Kolloquien*, Berlin: Akademie-Verlag, 168–180.
- Carrier, Martin (2004b), „Knowledge and Control: On the Bearing of Epistemic Values in Applied Science“, in: P. Machamer & G. Wolters (Hrsg.), *Science, Values and Objectivity*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press; Konstanz: Universitätsverlag, 275–293.
- Carrier, Martin (2004c), „Knowledge Gain and Practical Use: Models in Pure and Applied Research“, in: D. Gillies (Hrsg.), *Laws and Models in Science*, London: King’s College Publications, 1–17.
- Cartwright, Nancy (1983), *How the Laws of Physics Lie*, Oxford: Clarendon Press.
- Cartwright, Nancy (1994), „Fundamentalism versus the Patchwork of Laws“, in: D. Papi-  
neau (Hrsg.), *The Philosophy of Science*, Oxford: Oxford University Press, 1996, 314–326.
- Cartwright, Nancy (1997), „Models: The Blueprints for Laws“, in: *PSA 1996 II. Supplement to Philosophy of Science* 64, 292–303.
- Cartwright, Nancy (1998), „How Theories Relate: Takeovers or Partnerships?“, in: *Philosophia Naturalis* 35, hrsg. v. B. Falkenburg & W. Muschik, 23–34.
- Cartwright, Nancy (2006), „Well-Ordered Science: Evidence for Use“, in: *PSA 2004. Supplement to Philosophy of Science*, im Druck.
- Commission of the European Communities (2000), „Communication from the Commission on the Precautionary Principle“, [http://europa.eu.int/comm/dgs/health\\_consumer/library/pub/pub07\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/dgs/health_consumer/library/pub/pub07_en.pdf)
- Dasgupta, Partha & Paul A. David (1994), „Toward a New Economics of Science“, in: *Research Policy* 23, 487–521.
- Davidson, Richard (1986), „Sources of Funding and Outcome of Clinical Trials“, in: *Journal of General Internal Medicine* 12/3, 155–158.
- Douglas, Heather (2000), „Inductive Risk and Values“, in: *Philosophy of Science* 67, 559–579.
- Duhem, Pierre (1906), *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*, Hamburg: Meiner, 1978.
- Etzkowitz, Henry (2003), „Innovation in Innovation: The Triple Helix of University-Industry-Government Relations“, in: *Social Science Information* 42, 293–337.
- Fox Keller, Evelyn (2000), *The Century of the Gene*, Cambridge Mass.: Harvard University Press.
- Funtowicz, Silvio O. & Jerome R. Ravetz (1993), „The Emergence of Post-Normal Science“, in: R. von Schomberg (Hrsg.), *Science, Politics, and Morality. Scientific Uncertainty and Decision Making*, Dordrecht: Kluwer, 85–123.
- Funtowicz, Silvio O. & Jerome R. Ravetz (1994), „Uncertainty, Complexity and Post-Normal Science“, in: *Experimental Toxicology and Chemistry* 13, 1881–1885.
- Gibbons, Michael et al. (1994), *The New Production of Knowledge. The Dynamics of Science and Research in Contemporary Sciences*, London: Sage.
- Hartmann, Stephan (1999), „Models and Stories in Hadron Physics“, in: Morgan & Morrison 1999, 326–346.
- Hohlfeld, Rainer (1979), „Strategien gegen Krebs – Die Planung der Krebsforschung“, in: W. van den Daele, W. Krohn & P. Weingart (Hrsg.), *Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung*, Frankfurt: Suhrkamp, 181–238.
- Johannes Paul II. (2002), „Letter of John Paul II to H.E. Msgr. Josef Kowalczyk Participating in the International Conference on Conflict of Interest and its Significance in

- Science and Medicine, Warschau, 5.–6.4.2002“, [http://www.vatican.va/holy\\_father/john\\_paul\\_ii/letters/2002/documents/hf\\_jp-ii\\_let\\_20020411\\_conference-poland\\_en.html](http://www.vatican.va/holy_father/john_paul_ii/letters/2002/documents/hf_jp-ii_let_20020411_conference-poland_en.html)
- Küppers, Günter & Johannes Lenhard (2005), „Computersimulationen: Modellierungen zweiter Ordnung“, in: *Journal for General Philosophy of Science* 36, im Druck.
- Krohn, Wolfgang & Wolfgang van den Daele (1997), „Science as an Agent of Change: Finalization and Experimental Implementation“, in: *Social Science Information* 36, 191–222.
- Lakatos, Imre (1970), „Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme“, in: ders. & A. Musgrave (Hrsg.), *Kritik und Erkenntnisfortschritt*, Braunschweig: Vieweg, 1974, 89–189.
- Maxwell, James C. (1861/62), *Über physikalische Kraftlinien*, hrsg. v. L. Boltzmann, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1986.
- Mill, John S. (1881), *Philosophy of Scientific Method*, hrsg. v. E. Nagel, New York: Hafner, 1950 (A *System of Logic*, 8., gekürzte Auflage, New York 1881).
- Morgan, Mary S. & Margaret Morrison (Hrsg.) (1999), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Sciences*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Morrison, Margaret (1998), „Modelling Nature: Between Physics and the Physical World“, in: *Philosophia Naturalis* 35, hrsg. v. B. Falkenburg & W. Muschik, 65–85.
- Morrison, Margaret (1999), „Models as Autonomous Agents“, in: Morgan & Morrison 1999, 38–65.
- Morrison, Margaret & Mary S. Morgan (1999), „Models as Mediating Instruments“, in: Morgan & Morrison 1999, 10–37.
- Nowotny, Helga, Peter Scott & Michael Gibbons (2001), *Rethinking Science. Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty*, Cambridge: Polity.
- Polanyi, Michael (1962), *Personal Knowledge. Towards a Post-Critical Philosophy*, London: Routledge & Kegan Paul.
- Quine, Willard V.O. & J. S. Ullian (1978), *The Web of Belief*, New York: Random House, 2. Auflage.
- Ramsey, Jeffry L. (1997), „Between the Fundamental and the Phenomenological: The Challenge of the Semi-Empirical Methods“, in: *Philosophy of Science* 64, 627–653.
- Rosenberg, Nathan (1990), „Why do Firms do Basic Research (with Their Own Money)?“, in: *Research Policy* 19, 165–174.
- Sauer, Albrecht (2004), „Im Wandel der Gezeiten“, in: *Spektrum der Wissenschaft* 05/2004, 56–59.
- Shrader-Frechette, Kristin (1997), „Hydrogeology and Framing Questions Having Policy Consequences“, in: *Supplement to Philosophy of Science* 64, 149–179.
- Schweber, Silvan S. (1993), „Physics, Community and the Crisis in Physical Theory“, in: *Physics Today*, November 1993, 34–40.
- Stokes, Donald E. (1997), *Pasteur's Quadrant. Basic Science and Technological Innovation*, Washington D.C.: Brookings Institution Press.
- Strohman, Richard C. (1997), „The Coming Kuhnian Revolution in Biology“, in: *Nature Biotechnology* 15, 194–200.
- Vincenti, Walter G. (1997), „Engineering Theory in the Making: Aerodynamic Calculation ‘Breaks the Sound Barrier’“, in: *Technology and Culture* 38, 819–851.
- Wilholt, Torsten (2006), „Design Rules : Industrial Research and Epistemic Merit“, in: *Philosophy of Science*, im Druck.

- Winsberg, Eric (2003), „Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World,“ in: *Philosophy of Science* 70, 105–125.
- Ziman, John (2002), „The Continuing Need for Disinterested Research,“ in: *Science and Engineering Ethics* 8, 397–399.